



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

## MODERNÍ METODY VIZUALIZACE PROUDĚNÍ

MODERN FLOW VISUALIZATION TECHNIQUES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Kateřina Pištěcká

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Robert Popela, Ph.D.

BRNO 2017



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Letecký ústav  
Studentka: **Kateřina Pištěcká**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Robert Popela, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Moderní metody vizualizace proudění

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vizualizační metody jsou nedílnou součástí aerodynamických experimentů a to jak v aerodynamických tunelech tak při letových zkouškách. Jejich organizace a použitý princip určují míru poznatků získaných o daném problému. Jejich vývoj v posledních desetiletích zaznamenal další pokrok.

### Cíle bakalářské práce:

Provedení rešerše metod vizualizace proudění a to jak z historického hlediska, tak z hlediska aktuálně intenzivně využívaných moderních metod v dané oblasti.

### Seznam doporučené literatury:

BARLOW J. B., RAE W. H., POPE A.: Low-Speed Wind Tunnel Testing, Wiley and Sons, 1999, ISBN: 978-0-471-55774-6.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Předmětem této bakalářské práce je pojednání o metodách vizualizace proudění využívaných v aerodynamických tunelech a případně při letových zkouškách. V první části práce jsou popsány jednotlivé metody s ohledem na jejich vhodnost aplikace, požadavky a případná omezení. Druhá část práce je věnována výběru vizualizační metody vhodné pro řešení konkrétního problému obtékání v aerodynamickém tunelu Leteckého ústavu VUT v Brně.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

vizualizace proudění, aerodynamický tunel, experimentální metody

## **ABSTRACT**

The subject of this bachelor thesis is an overview of the flow visualization methods applied in the wind tunnels and fly tests. An overview of flow visualization methods is presented in the first part of the work. The particular methods are presented and evaluated with respect of its complexity, requirements on the instrumentation and expanses. The pros and cons are mentioned for each method finally. The second part of the work deals with selection of the flow visualization method suitable for application in the wind tunnel of the Aeronautical department of the VUT Brno.

## **KEYWORDS**

flow visualization, wind tunnel, experimental methods



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracovala samostatně pod vedením Ing. Roberta Popely, PhD., s využitím odborné literatury a dostupných zdrojů uvedených na konci této práce.

V Brně dne 23. 5. 2017

.....

Kateřina Pištěcká





## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce Ing. Robertu Popelovi, PhD. za odborné konzultace a věnovaný čas v rámci této bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat své rodině a blízkým, kteří mě během studia podporovali.



# OBSAH

|  |    |
|--|----|
| ÚVOD .....   | 13 |
| 1 HISTORIE .....   | 15 |
| 2 DEFINICE POJMŮ .....   | 18 |
| 3 ROZDĚLENÍ METOD VIZUALIZACE PROUDĚNÍ .....                           | 20 |
| 4 PRINCIPY VYBRANÝCH METOD .....                                       | 21 |
| 4.1 Povrchové metody.....  | 21 |
| 4.1.1 Fyzikální metody .....   | 21 |
| 4.1.2 Chemické metody .....  | 23 |
| 4.1.3 Mechanické metody.....   | 24 |
| 4.1.4 Metody vizualizace proudění pomocí teplotních polí.....          | 28 |
| 4.2 Objemové metody .....  | 30 |
| 4.2.1 Metody založené na principu sledování látek či částic .....      | 30 |
| 4.2.2 Optické metody.....  | 34 |
| 5 PŘEHLED METOD.....   | 45 |
| 6 VÝBĚR VIZUALIZAČNÍ METODY .....                                      | 48 |
| 6.1 Podmínky experimentu .....   | 48 |
| 6.2 Stanovení vhodné metody .....                                      | 48 |
| 6.2.1 Aplikace metody vizualizace proudění pomocí kouře .....          | 49 |
| 6.2.2 Aplikace metody vizualizace pomocí heliových bublin .....        | 50 |
| 6.2.3 Aplikace metody vizualizace proudění pomocí nitřových sond ..... | 50 |
| 6.3 Zhodnocení.....  | 51 |
| 7 ZÁVĚR .....  | 53 |
| SEZNAM ZDROJŮ .....  | 54 |
| SEZNAM ZKRATEK.....  | 57 |



## ÚVOD

Efektivním prostředkem pro získání představy o proudění transparentních tekutin, které nelze postřehnout lidským okem, jsou metody vizualizace proudění. Tyto metody mohou posloužit např. při ověřování přesnosti teoretických modelů fyzikálních jevů, vizualizaci vektorových polí nebo také při designu nových automobilů a letadel, kde je požadavkem např. snížení spotřeby nebo zvýšení účinnosti. Význam těchto metod tedy spočívá zejména v jejich praktickém využití a širokém rozsahu aplikací ať už v rámci leteckého, automobilového nebo také farmaceutického průmyslu.

Existuje mnoho metod vizualizace proudění, od velmi jednoduchých až po složité, které vyžadují mnohdy sofistikovaná zařízení, jako jsou aerodynamické tunely či optické systémy.

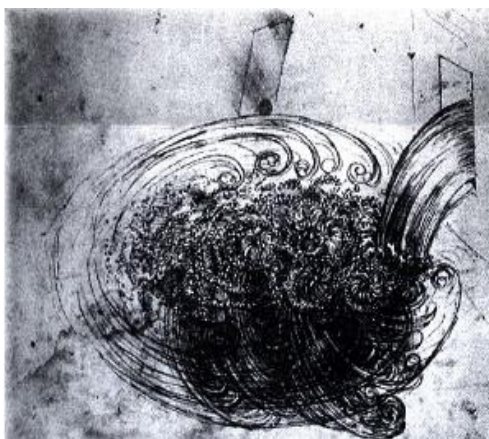
S pokrokem v oblasti laserové a výpočetní techniky dochází také k modernizaci vizualizačních metod. Aplikací těchto moderních metod lze např. získat nový náhled na stávající problémy v mechanice tekutin nebo ověřit výsledky počítačových analýz.

Cílem této práce je uvést přehled jednotlivých metod vizualizace proudění v aerodynamických tunelech, případně při letových zkouškách a přiblížit jednotlivé metody s ohledem na jejich vhodnost aplikace, výhody a případná omezení.



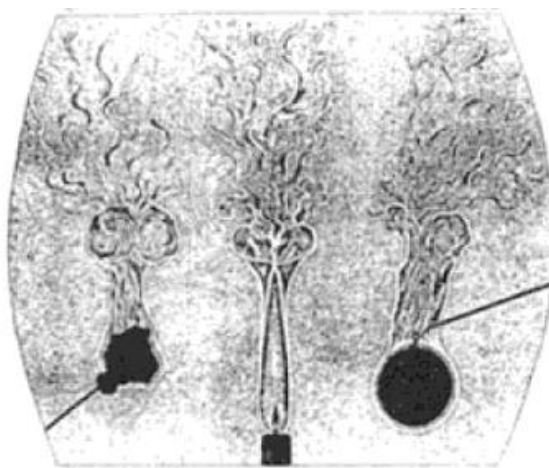
# 1 HISTORIE

První pokusy o vizualizaci proudění lze datovat již do počátku 16. století. Jejich ústřední postavou byl italský renesanční umělec a vynálezce *Leonardo da Vinci* (1452–1519), jehož rozsáhlé studie zahrnovaly mimo jiné také vizualizaci vodních proudů – v potrubích i kolem těles [34].



Obr. 1 da Vinciho představa o proudění [23]

*Jean Paul Marat* (1743–1793) je znám zejména jako jeden z představitelů Velké francouzské revoluce a jako fyzik a vědec téměř upadl v zapomnění. Jeho přínos spočívá zejména ve svazku *Fyzika ohně*, který obsahuje pravděpodobně první optickou vizualizaci proudění [5].



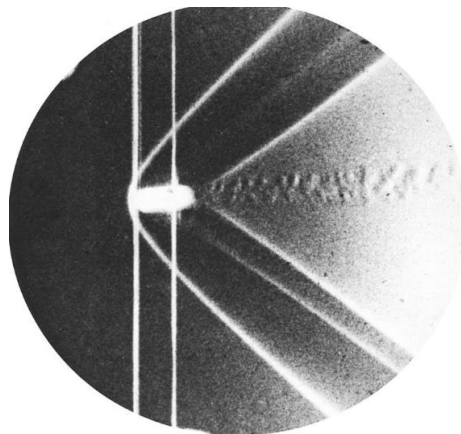
Obr. 2 Maratova vizualizace teplotního pole – pravděpodobně první publikovaný stínogram [5]

Dalším průkopníkem byl *August Toepler* (1836–1912), který ve své době využíval ke zviditelnění proudění tzv. šlírovou metodu. Tuto metodu uplatnil při vizualizaci tepelných a proudových jevů, což mu dále umožnilo studovat šíření, odraz a lom rázových vln [32].

Dále je třeba uvést českého fyzika *Vincenze Dvořáka* (1848–1922), který jako první vědecky prozkoumal stínovou metodu a provedl obdobu experimentů A. Toeplera se záměrem ukázat, že podobných výsledků lze dosáhnout i prostřednictvím této jednodušší metody [5].

V roce 1883 učinil *Osborne Reynolds* (1842–1912) sérii experimentů, při nichž, prostřednictvím barviva, demonstroval podmínky laminárního a turbulentního proudění kapaliny v trubici [31].

Velkou zásluhu na experimentální vizualizaci proudění má *Ernst Mach* (1838-1916), který také navázal na Augusta Toeplera a jako první využil šlírovou metodu k vizualizaci dějů, spojených s náhlými změnami stavů plynů. V 80. letech 19. století byl schopen vytvořit šlírovou fotografii projektilu, pohybujícího se supersonickou rychlostí [7].

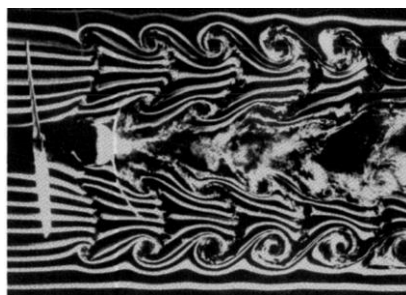


Obr. 3 Šlírová fotografie projektilu, pohybujícího se nadzvukovou rychlostí [23]

S prací *Ludwiga Macha* (1868–1951) odstartovaly vizualizace proudění v aerodynamických tunelech. Machem navržený aerodynamický tunel disponoval měřícím prostorem o rozměrech  $(180 \times 250)$  mm a proudění bylo realizováno radiálním ventilátorem. Rychlost proudění v tomto tunelu dosahovala okolo  $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Proudění bylo vizualizováno prostřednictvím hedvábných nití, cigaretového dýmu a rozžhavených ocelových částic [33].

Německý fyzik *Ludwig Prandtl* (1875–1953), který je považován za zakladatele moderní mechaniky tekutin, se výrazně podílel mimo jiné také na vývoji aerodynamických profilů a realizaci Göttingenského aerodynamického tunelu. Tento tunel byl zkonstruován pro rychlosti proudění okolo  $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , což byla rychlost, jíž dosahovaly tehdejší letouny [6]. Pro vizualizaci proudění v aerodynamickém tunelu využil v roce 1923 Prandtl kouře, jakožto vizualizačního prostředku [33].

Zásadní přínos v oblasti zdokonalení vizualizace proudění pomocí kouře je prisuzován také *Franku N. M. Brownovi* (1902–1976), který jako první vytvořil 3D a stereo fotografie kouřových obrazů proudění [33].



Obr. 4 Úplav za rotující vrtulí zviditelněný pomocí kouře [33]



V. P. *Goddard* z Univerzity Notre Dame rozšířil Brownovu techniku a v roce 1959 stál u vzniku prvního nadzvukového aerodynamického tunelu. Modifikovaný šlírový systém umožňoval simultánní fotografování kouřových obrazců a stop rázových vln. U tohoto tunelu byl využit stejný generátor kouře a vstřikovací techniky jako u podzvukových tunelů. Fotografie byly pořizovány při rychlostech proudění dosahujících  $404 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [33].

V roce 1990 v DLR v Göttingenu uspěl *Jürgen Kompenhans* v měření transonického proudění v aerodynamickém tunelu za použití metody PIV, daná metoda však ještě nebyla vhodná pro rutinní operace, jelikož generátor částic neumožňoval vytvářet dostatek částic vhodné velikosti, homogenně rozložených v laserové rovině a zdroj energie navíc vyžadoval dobíjení [25].

## 2 DEFINICE POJMŮ

Proudění lze definovat jako pohyb tekutiny, při kterém se částice, jimiž je tvořena, pohybují převážně v jednom směru. Jelikož jednotlivé částice tekutiny mohou vzájemně měnit polohu, je pohyb tekutin komplikovanější než pohyb pevných látek. Každá částice disponuje určitou rychlostí, jejíž velikost, příp. směr se může v čase měnit [24].

Pod pojmem tekutina jsou zahrnuty všechny kapalné a plynné látky.

Rozdělit proudění lze z hlediska [27]:

### *Vazkosti*

- Vazké (newtonské, nenewtonské)
- Nevazké

### *Stlačitelnosti*

- Stlačitelné
- Nestlačitelné (týká se kapalin za běžných podmínek, případně plynů při nízkých rychlostech)

### *Ustálenosti*

- Stacionární
- Nestacionární

### *Geometrie*

- 1D
- 2D
- 3D

Kinematika proudění popisuje pohyb částic tvořících tekutinu, bez uvažování příčin jejich pohybu (např. působících sil).

- Podobnostní čísla zohledňovaná při vizualizaci proudění

*Reynoldsovo číslo*  $Re$  udává charakter proudění – přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním. Toto bezrozměrné číslo je dáno poměrem setrvačných a viskózních sil. Je důležitým podobnostním číslem viskozity (odporu prostředí v důsledku vnitřního tření). Toto číslo lze vyjádřit vztahem (1), kde  $v_\infty$  je rychlost nerušeného proudu,  $L$  je charakteristický rozměr a  $\vartheta$  je kinematická viskozita.

$$Re = \frac{v_\infty \cdot L}{\vartheta} \quad (1)$$

*Machovo číslo*  $M$  lze charakterizovat poměrem rychlosti pohybu objektu k rychlosti zvuku v daném prostředí. Machovo číslo dělí režimy proudění na subsonické ( $M < 1$ ), transonické ( $M \approx 1$ ), supersonické ( $M > 1$ ) a hypersonické ( $M > 5$ ).

- Definice režimů proudění

*Laminární proudění* je takové proudění tekutiny, kdy její částice proudí ve vrstvách a zároveň mezi těmito vrstvami nepřecházejí.

O *Turbulentním proudění* lze hovořit v případě, když se částice tekutiny pohybují i napříč vrstvami.

*Stacionární proudění* je takové proudění, kdy je rozložení parametrů proudového pole v každém jeho bodě nezávislé na čase  $t$  a lze jej tedy vyjádřit prostřednictvím rovnice (2) a (3), kde  $P$  je jakákoliv veličina tohoto proudového pole a  $x, y, z$  jsou souřadnice proudového pole [35].

$$\frac{\partial P}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

$$P = P(x, y, z) \quad (3)$$

*Nestacionární proudění* je takové proudění, kdy jsou vlastnosti proudového pole s časem proměnné. Do této skupiny patří např. režim spouštění aerodynamického tunelu [35].

#### ○ Definice charakteristik proudového pole

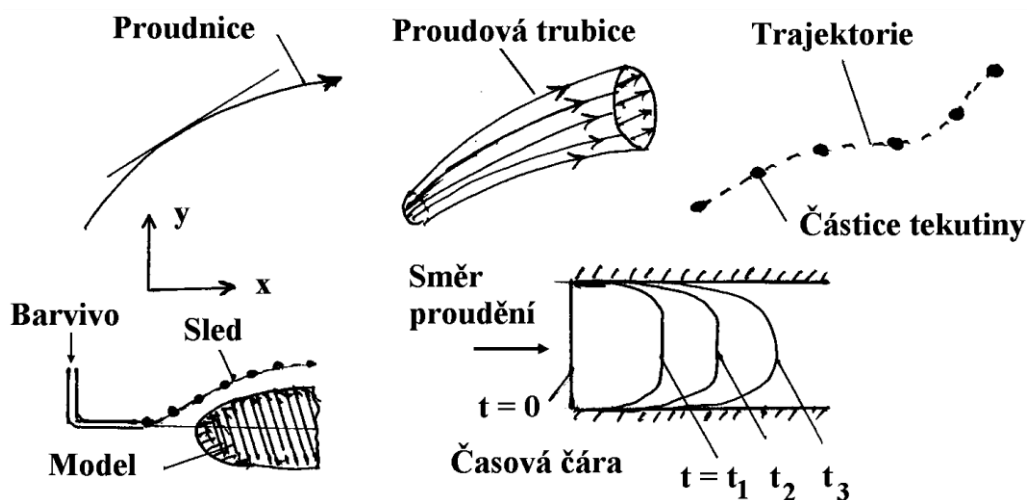
*Proudnice (streamline)* je myšlená křivka, která je v každém bodě tangenciální k lokálnímu vektoru rychlosti v daném okamžiku [37].

*Trajektorie (pathline)* je okamžitá dráha individuální částice tekutiny zaznamenaná v daném časovém intervalu [37].

*Sled (streakline)* je křivkou spojující částice, které prošly referenčním bodem postupně v různých časových okamžicích. Tato křivka je funkcí daného referenčního bodu, ze kterého jsou částice vypouštěny, pro stacionární proudění není funkcí času [27]. Sledy jsou stanoveny pro určitý časový okamžik [28].

*Časové čáry (timelines)* vznikají spojením částic, vypuštěných ze sledované oblasti v daný časový okamžik. Tvar této časové čáry je závislý na počátečním čase  $t_1$  a zpoždění pozorování  $t_3 - t_1$ . U stacionárního proudění není závislý na počátečním čase ale pouze na zpoždění [27].

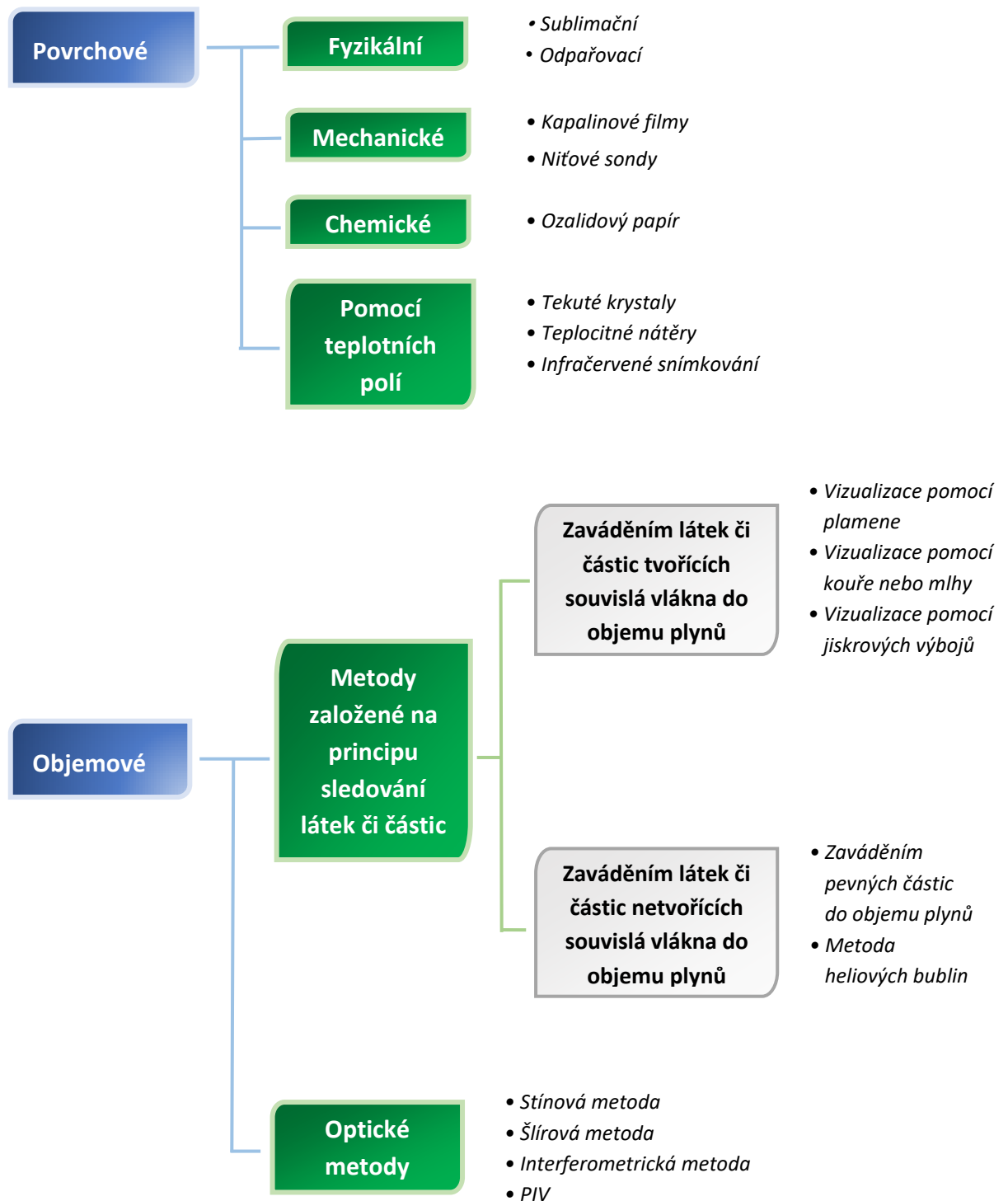
V případě stacionárního proudění jsou sledy, trajektorie a proudnice shodnými křivkami.



Obr. 5 Základní pojmy proudového pole [36]

### 3 ROZDĚLENÍ METOD VIZUALIZACE PROUDĚNÍ

Metody vizualizace proudění lze kategorizovat např. dle níže uvedeného schématu. Mimo toto rozdělení lze dělit jednotlivé metody také na elementární, lokální a globální, příp. kontaktní či bezkontaktní. Další alternativou je dělení metod na kvalitativní a kvantitativní.



## 4 PRINCIPY VYBRANÝCH METOD

V rámci této kapitoly jsou přiblíženy principy vybraných zástupců jednotlivých skupin metod vizualizace proudění. Tito zástupci byli vybráni zejména s ohledem na jejich praktickou využitelnost.

### 4.1 Povrchové metody

Jedná se převážně o metody, kdy je na povrch modelu nebo příp. reálného letounu nanесena vrstva krycího materiálu, který vlivem okolního proudění mění své vlastnosti a indikuje tak lokální podmínky tohoto proudění. Tyto metody lze také označit jako kontaktní, je tudíž vhodné počítat s určitým ovlivněním proudění.

#### 4.1.1 Fyzikální metody

Metody založené na fyzikálních jevech jako je sublimace, příp. odpařování krycího materiálu do okolního proudění, jsou jedním z prostředků vizualizace přenosu hmoty mezi povrchem modelu a proudícím plynem [1].

Vychází se zde ze skutečnosti, že rychlost průběhu daných fyzikálních procesů závisí na lokálním charakteru proudění (laminární, turbulentní) – vlivem intenzivnějšího promíchávání částic v oblastech turbulentního proudění probíhají uvedené fyzikální procesy rychleji, než v oblastech laminárního proudění [2].

Jednotlivé oblasti povrchu jsou po vizualizačním procesu odlišeny např. rozdílným barevným odstínem.

Při každé změně polohy modelu v aerodynamickém tunelu je třeba obnovit indikační krycí vrstvu a měření opakovat.

- *Sublimační metody*

Princip těchto metod spočívá v nanесení vhodného nátěru např. na bázi azobenzenu, fluorenu nebo naftalenu na povrch modelu a následném vytvoření stopy proudění vlivem působení tohoto proudění za podmínek definovaných v aerodynamickém tunelu [2].

Na povrch modelu se příslušné látky nanášejí suchým stříkáním, příp. nátěrem v kapalném stavu za vyšších teplot.

Pomocí metody, která využívá vlastností naftalenu, lze získat i některé kvantitativní informace (např. koeficient přenosu hmoty). Povrch modelu je v tomto případě pokryt vrstvou hustého naftalenu, který postupně sublimuje do proudění, a tak se na původně hladkém povrchu utváří reliéf.

Tvar reliéfu je dán rychlostí sublimace v jednotlivých oblastech – tedy lokálními podmínkami proudění [1].

Nevýhody [13]:

- Pro každou polohu modelu a následný proces vizualizace je nutné model opatřit novou vrstvou nátěru
- Podmínka barvy modelu – model by měl být tmavý (ideálně černý), aby se dosáhlo požadovaného kontrastu s bílou barvou látek, které tvoří nátěr

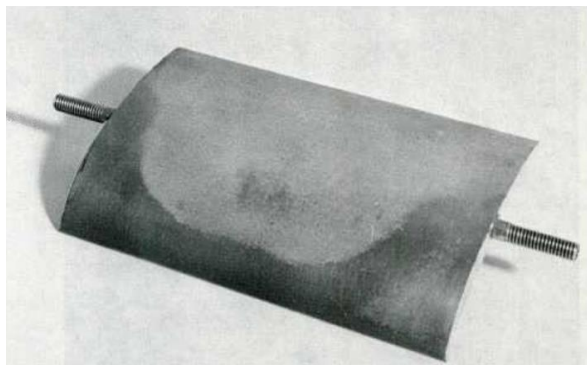
- Metody této kategorie nejsou příliš vhodné pro letové zkoušky, jelikož neposkytují možnost načasovat počátek vizualizačního procesu, který probíhá samovolně, dalším problémem je zajistit ustálený let v delších časových intervalech (nad deset minut)
- Tlakové snímače musí být zakryty, aby se předešlo jejich ucpání
- Kontaktní metody
- Indikační látku je nutno volit s ohledem na podmínky proudění (rychlost, teplota atd.)

Výhody:

- Snadná realizovatelnost
- Po vyjmutí modelu z aerodynamického tunelu stopa proudění setrvá na povrchu modelu po určitou dobu (několik minut), čehož lze využít a zaznamenat ji
- Není třeba drahých optických zařízení
- Metody jsou použitelné v rámci širokého rozmezí rychlostí proudění (podzvukové i nadzvukové)

Využití:

Metody této kategorie jsou vhodné k rychlým laboratorním zkouškám, umožňují zkoumat charakter proudění na povrchu modelu – zejména je lze využít pro určení hranice přechodu proudění. Užívají se téměř výhradně pro kvalitativní studium proudového pole.



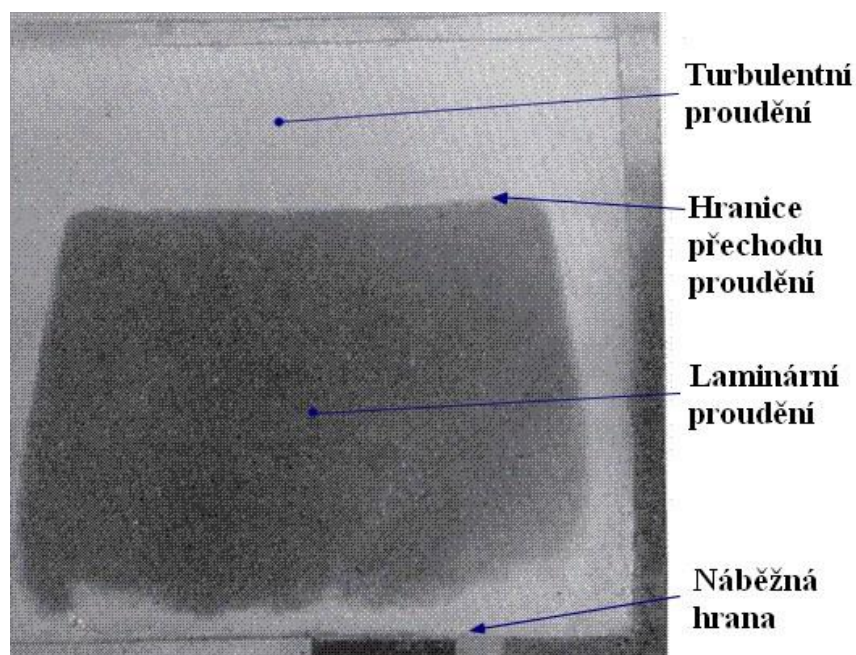
*Obr. 6 Vizualizace hranice přechodu laminárního a turbulentního proudění při nízkém povrchovém tlaku na modelu turbínové lopatky, tato vizualizace byla provedena pomocí azobenzenu, který sublimuje rychleji v oblasti turbulentní mezní vrstvy [1]*

- *Odpařovací metody*

- *Metoda kaolinových nátěrů*

Povrch modelu je pokryt vrstvou kaolinu, poté je tato vrstva jemně obroušena (pro zahlázení povrchových nerovností), a nakonec je postříkána těkavou látkou. Po uvedení tunelu do chodu se začne těkavá látka odpařovat a přitom zanechává na sledovaném povrchu stopy.

V oblasti turbulentního proudění dochází k intenzivnějšímu promíchávání částic, tudíž je rychlost odpařovacího procesu vyšší a vrstva se stává matnou, čímž se díky difuznímu odrazu světla jeví světlejší. Oblast, kde dochází k laminárnímu proudění, zůstává naopak lesklá a jeví se tak tmavší [2].



Obr. 7 Vizualizace proudění pomocí metody kaolinových nátěrů [38]

Výhody a nevýhody metody kaolinových nátěrů jsou obdobné jako u sublimačních metod. Mimo tyto lze z nevýhod zmínit možné ovlivnění povrchových nerovností modelu vlivem tlustší vrstvy nátěrového materiálu [2] a z výhod např. možnost opakovaného využití základní kaolinové vrstvy [38]. Metoda poskytuje dobré výsledky zejména v oblasti určování hranic přechodů proudění a využívá se převážně pro získání kvalitativních informací o proudění.

#### 4.1.2 Chemické metody

Jedná se o metody založené na principu chemických reakcí povrchové krycí vrstvy obsahující jednu chemickou složku a proudícího média, do kterého je přimíchána druhá chemická složka. U těchto metod se využívá odlišnosti průběhu reakce v oblastech turbulentního a laminárního proudění [2]. Uvedené metody lze využít jak při letových zkouškách, tak při zkouškách v aerodynamickém tunelu.

Nevýhody:

- Reaktanty jsou obvykle zastoupeny chemickými látkami, které není vhodné využívat při vyšších koncentracích, příp. při sérii experimentů v uzavřených prostorech
- Trysky zavedené v blízkosti povrchu modelu mohou ovlivnit proudové pole

Výhody

- Na rozdíl od fyzikálních metod lze zvolit počátek vizualizačního procesu, což umožňuje např. eliminovat vliv nestabilních podmínek proudění při spouštění tunelu, příp. je možné metodu využít i v rámci letových zkoušek
- Vzniklá stopa proudění setrvá na povrchu modelu i po vypnutí aerodynamického tunelu, čehož lze využít a zaznamenat ji

Využití:

Metody spadající do této kategorie lze využít pro zkoumání charakteru proudění v blízkosti povrchu modelu – pro určení směru lokálního proudění, vizualizace hranice přechodu proudění.

○ *Metoda využívající ozalidový papír*

Princip této metody spočívá v polepení sledovaného povrchu ozalidovým papírem (papír citlivý na světlo) a přiváděním čpavku do oblasti tohoto povrchu pomocí soustavy trysek. Čpavek způsobí na papíře vznik tmavých stop, které jsou orientovány ve směru proudění [2].

○ *Metoda využívající chemické reakce chloridu rtuťnatého a přiváděného čpavku*

Na sledovaný povrch je nanesen nátěr chloridu rtuťnatého a do blízkosti tohoto povrchu je přiváděn tryskami čpavek vytvářející proudová vlákna. Jelikož v oblasti turbulentního proudění dochází velmi rychle k difuzi čpavku do okolí, nevzniká v těchto oblastech výrazné zabarvení nátěru. Na rozdíl od vizualizace proudění pomocí kouře, popsané v kapitole 4.1.3, je tato metoda použitelná i při vyšších rychlostech proudění. Vlákno čpavku je za daných podmínek také rozptylováno, avšak nátěr je dostatečně citlivý na to, aby reagoval i při nízkých koncentracích přiváděného čpavku [2].

#### **4.1.3 Mechanické metody**

Podstatou těchto metod je změna polohy malých částic, které jsou součástí povrchových nátěrů, nebo změna polohy vláken, připevněných na modelu či reálném letounu. Míra ovlivnění proudění je u metod této kategorie odlišná.

- *Vizualizace proudění pomocí olejových filmů*

Sledovaný povrch je pokryt tenkou vrstvou oleje s příměsí jemného práškového pigmentu. V okamžiku, kdy na model začne působit proudění, je tímto olejová složka filmu postupně unášena, zatímco pigment setrvává na povrchu modelu, kde vytváří viditelnou stopu.

Z tvaru stopy lze např. určit směr proudění v blízkosti sledovaného povrchu.

Hustota směsi oleje a pigmentu ovlivňuje její schopnost pohybovat se po povrchu a zároveň vytvářet nezkreslenou stopu. V ideálním případě by nemělo dojít k pohybu směsi dříve, než je dosaženo požadovaných podmínek proudění a po uplynutí stanovené doby by měla být stopa ztuhlá natolik, aby nebyla ovlivněna nestabilním prouděním po zastavení tunelu. Splnění těchto předpokladů však bývá problematické [1].

Z výše uvedeného vyplývá, že čím nižší je rychlost proudění, tím nižší by měla být viskozita oleje. Kapaliny, které se používají jakožto nosiče pigmentu, lze seřadit vzestupně dle jejich viskozity v následujícím pořadí: líh, kerosin, lehký olej (nafta), lehký transformátorový olej [1].

Viskozita a povrchové napětí těchto kapalin může být upraveno prostřednictvím vhodných aditiv.

Požadavkem pro volbu pigmentové složky směsi je její schopnost vytvářet zřetelnou stopu na povrchu modelu. Bílý prášek jako je např. oxid titaničitý ( $\text{TiO}_2$ ) nebo kaolin se



využívá u tmavých povrchů a naopak lampové saze – jemný prášek, který je dobře smísitelný s olejem – lze využít u světlých povrchů.

Schopnost pigmentu rozptýlit se v olejovém nosiči lze podpořit přidáním malého množství kyseliny olejové do směsi [1].

Další možností je využití fluorescenčního filmu, který při osvětlení UV světelným zdrojem vytváří výraznou netransparentní stopu [1].

Za působení proudění dochází k částečnému odtékání ve směru tohoto proudění a částečnému vypařování olejové vrstvy, přičemž tloušťka dané vrstvy je ovlivněna tečným napětím – je závislá na jeho velikosti a směru. Při osvětlení UV světelným zdrojem jsou jednotlivé tloušťky vrstvy dobře rozeznatelné, jelikož platí, že čím větší je tloušťka filmu, tím zřetelněji se jeví daná oblast na pořízeném záznamu (viz Obr. 8).

Tloušťku filmu lze měřit prostřednictvím metod využívajících interference světla v této vrstvě [2].



Obr. 8 Vizualizace proudění na povrchu modelu pomocí fluorescenčního filmu [15]

Nevýhody:

- Olejová složka nátěru je částečně unášena prouděním a částečně se odpařuje, což obvykle vede ke znečištění prostorů aerodynamického tunelu
- Kontaktní metoda
- Stopa proudění není trvalého charakteru

Výhody:

- Snadná realizovatelnost
- Při využití fluorescenční složky je stopa proudění výrazná a lze dobře rozeznat jednotlivé oblasti
- Stopa setrvává určitou dobu na povrchu modelu i po vypnutí tunelu

Využití:

Tato metoda je vhodná pro vizualizace laminárního i turbulentního proudění, oblasti odtržení proudění a zpětného proudění. Při výběru vhodného oleje je možno ji využít i při vysokých rychlostech proudění. Pomocí této metody lze určit také polohy rázových vln a tlakových maxim.

Tuto metodu lze využít také v rámci kvantitativního určování povrchového tření, přičemž se předpokládá, že změna tloušťky vrstvy v čase je úměrná lokální hodnotě povrchového tření [2].

- *Metoda vizualizace proudění pomocí vazkých olejových nátěrů*

Základem této moderní metody je zaznamenat některý z nepatrných posuvů krycí olejové vrstvy a následně numericky reprodukovat stopu proudění.

Nátěr obsahuje určité množství luminiscenčních částic, které jsou zachyceny nejméně na dvou snímcích exponovaných v určitém časovém intervalu. Tyto snímky jsou následně zpracovány metodou křížové korelace, pro získání vektorů posunutí daných částic.

Směr posunu částic je tečný k proudnicím, což umožňuje zviditelnění stopy proudu na povrchu modelu.

Vzhledem k vysoké přesnosti korelační metody dokonce i malý posun olejové vrstvy (v řádech několika pixelů) může posloužit pro kompletní vizualizaci. Ve výsledku lze vyšetřovat až několik režimů proudění na jednu přípravu modelu.

Jelikož jsou oba analyzované snímky získány při shodných parametrech proudění, získaná stopa proudění odpovídá těmto parametrům a nezávisí na historii proudění a to včetně podmínek proudění odpovídajících spouštění tunelu.

Pomocí této metody lze vizualizovat povrchové proudnice a hranice přechodu mezní vrstvy. Do budoucna se také počítá s možností získat z těchto zkoušek rozložení stříhového napětí.

Metodu lze aplikovat od subsonických až do hypersonických podmínek proudění. Omezení metody spočívá v rámci teplot – metodu lze použít do teploty povrchu těles 200 °C.

Výhody a nevýhody této metody jsou obdobné jako u předchozí metody [14].

- *Metoda vizualizace proudění pomocí nitových sond*

Princip této metody spočívá v připevnění krátkých vláken, tvořených monovláknovým nylonem, polyesterem nebo bavlněnými nitěmi, na povrch sledovaného modelu, příp. reálného letounu.

Základem je zvolit vhodnou délku a váhu vláken s ohledem na dosažení minimálního ovlivnění proudového pole. Volba těchto parametrů závisí na velikosti pokrývaného povrchu a na podmínkách proudění.

Vlákna je dále možno potáhnout fluorescenčními barvivý pro zlepšení viditelnosti. V takovém případě se povrch modelu osvětluje UV světelným zdrojem [1].

Vlákna se obvykle připevňují k povrchu modelu prostřednictvím adheziva – lepidla nebo pásky.

Pokud jsou vlákna v klidu, nacházejí se v oblasti laminární mezní vrstvy. V případě, že je mezní vrstva turbulentní, začnou se vlákna pohybovat kmitavým pohybem. Pokud se

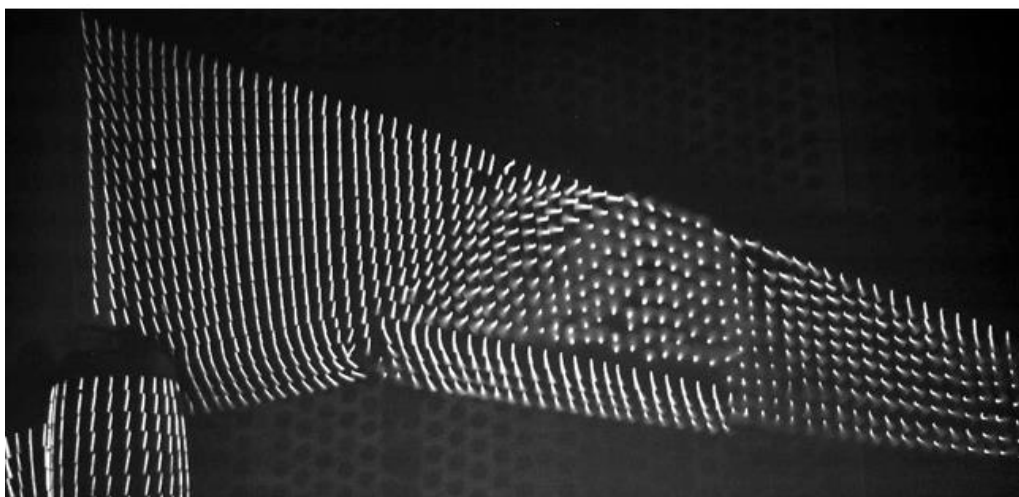
vlákna pohybují prudkými pohyby, příp. mají sklony odlepovat se od povrchu, indikuje toto chování oblast turbulentního odtržení [2].

Vlákna jsou poměrně levná, avšak s velikostí pozorovaného úseku stoupá také časová náročnost jejich aplikace na model, přičemž je důležité zajistit, aby nebyla odfouknuta proudem.

Dále je nutné poznamenat, že přítomnost vláken a jejich uchycení (lepicí páska, lepidlo) do jisté míry ovlivňuje proudění. Vlákna mohou působit jako vířiče a lokálně tak změnit charakter proudění.

Pro zjištění charakteru proudění ve volném proudě mimo povrch modelu se vlákna připevňují na závěsy [12].

Z hlediska nejmenšího ovlivnění proudění v rámci povrchových metod se jeví nejlépe metoda minibavlněk. K těmto účelům se využívají vlákna o průměru (0,02 – 0,04) mm, tvořené monovláknovým nylonem a potažené fluorescenčním barvivem. Tato vlákna se na povrch modelu připevňují lepením [3].



Obr. 9 Vizualizace pomocí minibavlněk při subsonických rychlostech proudění [39]

Nevýhody:

- S rostoucími rozměry pokrývaného povrchu stoupá časová náročnost aplikace bavlněk na tento povrch
- Metoda poskytuje pouze možnost kvalitativního posouzení proudění
- Kontaktní metoda
- Následkem nevhodné volby rozměrů, příp. materiálu vláken je ovlivnění proudění
- Zaznamenat stopu proudění lze pouze za působení tohoto proudění (aerodynamický tunel je zapnut, v případě letových zkoušek je nutné zaznamenat stopu za letu)

Výhody:

- Metodu lze použít při letových zkouškách
- Jedná se o finančně nenáročnou a jednoduchou metodu
- Rychlá vizualizace proudového pole
- Nezpůsobuje znečištění aerodynamického tunelu

Využití:

Metodu lze využít pro stanovení lokálního charakteru proudění – zejména určení směrů lokálních rychlostí, oblastí přechodu, separace proudění atd. Při využití mřížky s nitěmi lze vizualizovat také koncové víry.

#### **4.1.4 Metody vizualizace proudění pomocí teplotních polí**

Do této skupiny patří metoda vizualizace proudění pomocí nátěrů, které jsou senzitivní na teplotu, metoda vizualizace proudění pomocí tekutých krystalů a také metoda, která není závislá na pokrytí povrchu teplocitnou látkou – metoda infračerveného snímkování. Uvedené metody se vyznačují rozdílnými možnostmi aplikace a rozsahy citlivosti [1].

Nevýhody

- Tekuté krystaly a nátěry mohou být ovlivněny stříhovými silami
- IR snímkování vyžaduje optické prvky, což se projeví na pořizovací ceně vybavení
- Metody nejsou použitelné pro vizualizaci při letových zkouškách (kromě tekutých krystalů, ty byly dle [40] použity na letounu F-14)
- Při vizualizaci je kritickým bodem vhodné osvětlení a volba úhlu pozorování [40]
- Metoda je použitelná spíše pro vysokorychlostní proudění, kde nastává výraznější aerodynamický ohřev
- Model musí být z materiálu o nízké tepelné vodivosti

Výhody

- Dle konkrétních podmínek proudění lze vybírat z poměrně široké škály prostředků pro zviditelnění teplotního pole
- Metody poskytují možnost kvantifikace ve formě map

Využití:

Metody umožňují vizualizaci rozložení teplot na sledovaném povrchu, oblasti přechodu proudění a oblasti rázových vln [40]

- *Vizualizace proudění pomocí teplocitných nátěrů*

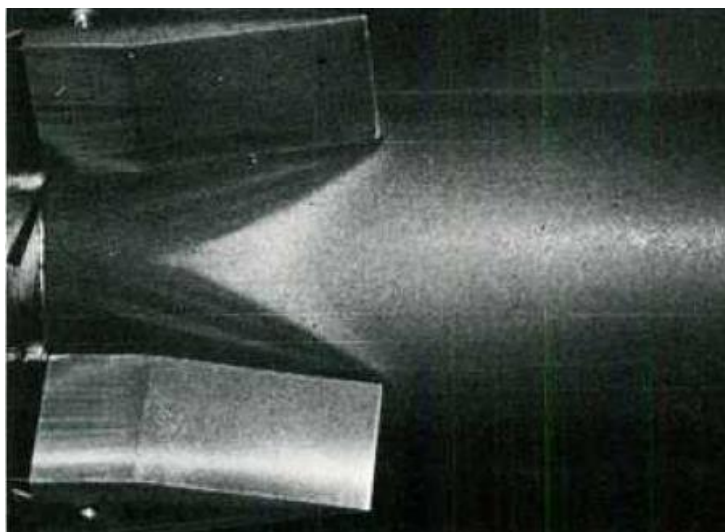
Tato metoda vizualizace proudění využívá nátěry, které jsou tvořeny několika složkami, přičemž každá z nich reaguje při charakteristické teplotě změnou své interní struktury, popř. fáze. Přechod mezi dvěma barvami je však poměrně nevýrazný, což snižuje lokální rozlišitelnost zobrazené oblasti.

Po této stránce je názornější jednosložková barva (fázově proměnlivý nátěr), která mění své skupenství z pevného na kapalné při konkrétní hodnotě teploty povrchu. Hlavní složkou těchto barev bývá obvykle vosk.

Dále je vhodné zmínit, že tyto nátěry mohou být rozrušeny vlivem vysokých stříhových napětí v proudovém poli a tento jev může být chybně interpretován jakožto fázová přeměna. V obou případech – jak u nátěrů senzitivních na teplotu, tak u fázově proměnlivých nátěrů, vždy dochází ke změně zbarvení povrchu, přičemž je tento efekt nevratný [1].

- *Vizualizace proudění pomocí tekutých krystalů*

Vratných barevných změn jakožto funkcí teploty lze docílit při pokrytí testovaného povrchu tekutými krystaly. Teplotní změny v těchto krystalech vyvolají rozrušení intermolekulárních sil, které způsobí posuv v molekulární struktuře a následkem je změna vlnové délky světla rozptýleného krystaly.



*Obr. 10 Povrchové teplotní rozložení zviditelněné pomocí tekutých krystalů v aerodynamickém tunelu při hypersonické rychlosti proudění. Směrové stabilizátory na válcovém trupu tělesa, jehož podélná osa leží ve směru proudění, vyvolávají při působení proudění šikmé rázové vlny. Průsečnice těchto rázových vln a válcového povrchu je viditelná díky růstu teploty vlivem rázu [1]*

Pro aplikace v oblasti mechaniky tekutin a přenosu tepla se obvykle využívají cholesterické tekuté krystaly. Tyto krystaly jsou běžně dostupné v široké škále citlivostních teplot. V rozmezí jejich citlivosti je možno rozeznat až deset barevných odstínů.

Tenká vrstva tekutých krystalů na sledovaném povrchu může být ovlivněna stříhovými silami, proto jsou krystaly v zájmu ochrany před tímto negativním jevem umístěny na plastové podložce a shora pokryty transparentní ochrannou vrstvou, případně jsou vyráběny jako mikroenkapsulované – tedy uzavřené ve sférických obalech o průměrech (10 – 50)  $\mu\text{m}$ .

Disperzí enkapsulovaných tekutých krystalů ve vodě vzniká emulze, kterou lze natřít, příp. nastříkat na model [1].

- *Metoda infračerveného snímkování*

Jedná se o metodu využívající skutečnosti, že povrch tělesa emituje infračervené záření, jehož intenzita je funkcí teploty tohoto povrchu. IČ záření je zachyceno IČ kamerou a signál je dále převeden na obrazovou stopu.

Daný způsob zahrnuje také snímač citlivý na vlnové délky v rozmezí (3 – 5,8)  $\mu\text{m}$ , který vytváří elektrický signál úměrný celkové přijaté energii.

Celková energie záření emitovaná snímaným povrchem, dle Stefanova-Boltzmannova zákona pro šedé těleso, je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty. Povrchovou teplotní stopu lze zobrazit na monitoru v reálném čase [1].

## 4.2 Objemové metody

Na rozdíl od povrchových metod, které umožňovaly zkoumat proudění víceméně pouze v bezprostředním okolí sledovaného povrchu, umožňují objemové metody vyšetřovat proudové pole v libovolných oblastech vymezeného prostoru.

Mezi tyto metody se řadí metody zavádění látek či částic do objemu plynu a optické metody.

### 4.2.1 Metody založené na principu sledování látek či částic

Jedná se o metody, kdy se do objemu plynu (obvykle vzduch) zavádí látka, případně určité množství částic, které zprostředkují vizualizaci. Tyto látky mohou – dle svých vlastností – po vpuštění do proudění tvořit buď souvislá, nebo nesouvislá vlákna.

- *Zavádění látek tvořících souvislá vlákna*

Mezi metody zviditelňování proudění plynů prostřednictvím látek, které tvoří souvislá vlákna, patří vizualizace proudění pomocí plamene, mlhy nebo kouře a metoda jiskrových výbojů.

- *Vizualizace pomocí kouře, mlhy*

Metoda využívá soustavy trysek, která generuje souvislá vlákna kouře nebo mlhy, přičemž, je-li to požadováno, lze tyto trysky umístit přímo na zkoumaný povrch [10].

#### *Vyvíječ kouře*

Pro potřeby vizualizace proudění může být kouř vytvářen spalováním tabáku, dřeva, pšeničné slámy nebo odpařováním uhlovodíkových olejů. Mlhu lze vytvořit např. z roztoku vody, glycerinu a dalších příměsí [10]. Bez ohledu na to, čím je vizualizační médium tvořeno, musí splňovat následující kritéria:

- být schopno spolehlivě sledovat proudění
- nesmí významně ovlivňovat zkoumané proudové pole
- musí disponovat značnými reflektivními vlastnostmi
- nesmí být toxické

Z hlediska spolehlivé kontroly množství dodávaného kouře se jeví jako nejvýhodnější odpařování uhlovodíkových olejů [4].

Velikost částic, tvořících kouř, se obvykle pohybuje okolo 0,5  $\mu\text{m}$ .

Nevýhody:

- Metoda není příliš vhodná pro tunely s uzavřeným okruhem, jelikož po určité době dochází k zaplnění prostorů kouřem a proces vizualizace není dále možný, příp. je třeba zkoušku přerušit a prostory zbavit kouře
- Částice, tvořící kouř, se usazují jak na modelu, tak i v prostorech aerodynamického tunelu a mohou tvořit nánosy, ovlivňující proudové pole [13]
- Je nutno zakrýt tlakové snímače, aby nedošlo k jejich ucpání [13]

- Metody nejsou použitelné při vyšších rychlostech proudění, jelikož dochází k rozptýlení kouřových vláken, což vede ke znemožnění pozorování, maximální rychlost proudění může dosahovat  $130 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [12]
- Je třeba zajistit, aby měl aerosol při výstupu z trysky stejnou rychlost jako působící proudění
- Stopu proudění je možné zachytit pouze za působení proudění (aerodynamický tunel je zapnut)

#### Výhody:

- Lze vizualizovat proudění v oblastech volného proudu i v blízkosti povrchu modelu či reálného letounu
- Jednoduchá metoda
- Při využití soustavy trysek je možno vizualizovat rozsáhlé oblasti
- Metodu lze použít i při letových zkouškách

#### Využití:

Metodu lze využít pro vizualizaci charakteru proudění v rámci celého proudového pole, umožňuje zviditelnit zejména oblasti separace proudění, úplav i koncové víry.

##### • *Metoda kouřového drátu*

Zahříváním tenkého odporového drátu pokrytého vrstvou oleje dochází k odpařování tohoto oleje a vzniká kouř.

Metoda byla původně vytvořena pro účely měření rychlostních profilů v mezních vrstvách. Pomocí této metody lze však také vizualizovat komplexní třídimenziální proudění – např. separační bubliny, strukturu proudění atd.

Pro vizualizace proudění prostřednictvím této metody je požadován pouze tenký ocelový drát, minerální olej a zdroj energie. Nejčastěji se používají dráty z korozi-vzdorné oceli, nichromu a wolframu. Rozměry drátu jsou podmíněny rychlostí proudění. Pro nízkorychlostní podmínky proudění je vhodné použít drát s menším průměrem, jelikož tento drát vytváří ostřejší kouřovou stopu. Při vyšších rychlostech proudění je naopak vhodnější drát s větším průměrem, jelikož je schopen lépe udržet požadovanou rychlost produkce kouře [4].

Dalším faktorem, který je třeba při výběru drátu zohlednit, je Reynoldsovo číslo – ve vztahu k drátu. S účelem minimalizovat rozrušení proudového pole, by mělo být Reynoldsovo číslo pro obtékání drátu v závislosti na jeho průměru menší než 20. U většiny aplikací se vhodný průměr drátu pohybuje okolo 0,1 mm [4].

Existuje množství olejů, které mohou být využity pro generování kouřových vláken (parafin, kerosin, silikonový olej atd). Parafin je dle [4] nejefektivnější. Aby se zajistila rovnoměrná produkce kouře po délce drátu, je důležité jeho stejnoměrně potažení olejem. Potažení drátu může být zprostředkováno gravitačním posuvem, případně manuálně prostřednictvím aplikátoru nebo automaticky pomocí kartáčů [4].



Obr. 11 Vizualizace proudění pomocí kouře okolo profilu NACA 4412, který se nachází pod značně velkým negativním úhlem náběhu [20]

Nevýhodou ve srovnání s přechozí metodou, která využívá generátoru kouře, je nutnost zajistit rovnoměrné potažení drátu vrstvou oleje, což není zcela jednoduché a v mnoha případech jsou k těmto účelům využívána speciální zařízení.

#### ○ Vizualizace proudění pomocí plamene

Jedná se o aplikaci plamene spalovaného plynu do proudícího vzduchu pomocí malé trysky, příp. hořáku ve tvaru trubky s množstvím otvorů [2].

Požadavkem je, aby měl plamen velkou délku a malý průměr. Metodu lze využít např. při zkoumání místní turbulence, pro zjištění hranice úplavu atd.

Nevýhodou ve srovnání s ostatními metodami, které spadají do této kategorie, je ohřev proudícího média a nutnost použití vhodných materiálů pro stavbu modelu, aby nedošlo k jeho poškození vlivem vysoké teploty.

#### ○ Vizualizace proudění pomocí jiskrových výbojů

Základem této metody jsou elektrody umístěné do zkoumané oblasti proudového pole, na které jsou přiváděny elektrické impulzy (napětí se pohybuje okolo 60 kV). Tyto impulzy mají za následek vznik jiskrových výbojů. Vysoce ionizovaná plasmová trubice je unášena proudem. Vzniklé stopy jsou obvykle zřetelné a lze je tedy přímo pozorovat, případně zaznamenávat pomocí běžného fotoaparátu nebo kamery. Tuto metodu je možno s výhodou aplikovat např. pro vizualizace proudění v rozšiřující se části vzduchového potrubí [2].

Výhody a nevýhody metody jsou obdobné jako u výše uvedených metod této kategorie.

#### • Zavádění látek netvořících souvislá vlákna

Jedná se o metody, kdy zaváděné látky, či částice netvoří v proudícím plynu souvislá vlákna.

#### ○ Vizualizace proudění zaváděním pevných částic do objemu plynu

Pro nižší rychlosti proudění (do  $100 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) je výhodné pro vizualizaci využít hliníkový prášek, příp. jemné balzové piliny, které dobře odrážejí světlo a disponují nízkou měrnou hmotností. Tyto metody nevyžadují žádné specifické požadavky na aerodynamické tunely.



Nevýhody:

- Je třeba zajistit, aby částice, tvořící prášek, měly vhodnou měrnou hmotnost a nedošlo tak k ovlivnění proudění

Výhody:

- Jedná se o jednu z nejjednodušších metod
- Není třeba drahé vybavení

Využití:

Metoda je vhodná pro získání základní představy o proudovém poli. Lze ji využít např. pro vizualizaci vírů. Z experimentů je možno získat i kvantitativní informace – např. rychlost proudového pole – pomocí chronofotografické metody [2].

#### ○ *Metoda barevných heliových bublin*

Metoda vizualizace proudění pomocí barevných heliových bublin patří mezi moderní metody vizualizace, které umožňují pozorovateli přímo sledovat chování proudového pole.

Generátor vytváří bubliny plněné heliem, které jsou neutrálně vznášivé a při vpuštění do proudu kopírují jeho pohyb.

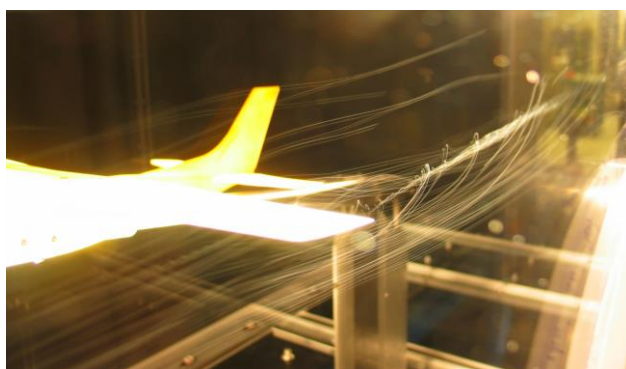
Světelný zdroj o vysoké intenzitě je umístěn před modelem a orientován ve směru proudění. Bubliny se zobrazují jako světlé prostorové stopy, které jsou kontrastní vůči tmavému pozadí testovací sekce aerodynamického tunelu, příp. povrchu modelu.

#### *Princip metody*

U této metody se vychází ze skutečnosti, že barevná odlišnost jednotlivých bublin je dána podmínkami interference světla na dané bublině.

Zbarvení bublin je tedy závislé na vlnové délce dopadajícího světla, indexu lomu, tloušťce bublinového filmu a úhlu odrazu od bublinového filmu.

Tloušťka bublinového filmu se volí okolo  $(0,5 - 1) \mu\text{m}$  v závislosti na vytyčených cílech experimentu. Tento parametr je lineárně závislý na průměru bubliny. V praxi to znamená, že lze regulovat tloušťku bublinového filmu skrze průměr bubliny. Díky této skutečnosti je možné zajistit požadovanou tloušťku filmu prostřednictvím vhodně zvoleného podílu látek tvořících bublinový film – stlačeného vzduchu, helia a např. substance CPY 240 3, která zajišťuje různá zbarvení vznikajících bublin [19].



Obr. 12 Vizualizace proudění pomocí monochromatických heliových bublin [36]

### Nevýhody

- Metoda vyžaduje generátor bublin
- Proudové pole musí být vhodně osvětleno, jinak nevznikne požadovaný kontrast

### Výhody

- Možnost barevné vizualizace – jednotlivé trajektorie jsou zřetelné i za předpokladu, že je jich velké množství a vzájemně se kříží
- Lze vizualizovat poměrně rozsáhlé oblasti
- Lze použít při proudění vyznačující se vyššími Reynoldsovými čísly [19]
- Metoda je použitelná i v rámci nestacionárního proudění, přičemž lze získat kvantitativní informace (lokální rychlosti proudového pole)
- Metoda je šetrná k životnímu prostředí ve srovnání s výše uvedenými chemickými metodami a lze ji aplikovat v uzavřeném prostoru
- Metoda má díky bublinám, které jsou neutrálně vznášivé, minimální vliv na působící proudění

### Využití:

Metodu lze využít pro vizualizaci charakteru proudění v rámci celého proudového pole. Umožňuje vizualizaci koncových vírů, oblastí separace proudění, zkoumání tvaru proudnic atd. Výpočtem lze stanovit také rozložení rychlostí proudění, které se získá se dvou či více snímků získaných při známé snímkovací frekvenci, nebo příp. z jednoho snímku získaného delší expozicí.

#### 4.2.2 Optické metody

Většina metod spadajících do této kategorie využívá stlačitelnosti plynů a z toho plynoucích změn v jejich vlastnostech – zejména změn indexu lomu, který se mění s hustotou, tlakem a teplotou plynu.

Optické metody lze dále dělit dle jevu, který umožňuje vizualizaci na [2]:

- *Refrakční metody* – jedná se o metody, jejichž základem je refrakce (lom) světla, do této skupiny spadá stínová a šlírová metoda
- *Interferometrické metody* – metody založené na interferenci světla, patří sem klasická interferometrie a její varianty

Dále do skupiny optických metod spadají také *metody založené na principu zavádění částic do tekutiny* – zejména metoda PIV.

#### • Refrakční metody

Některé druhy mořských živočichů jako jsou např. medúzy, mají v podstatě transparentní tělesnou schránku. Díky této vlastnosti je predátorů nemohou přímo vidět, avšak malé rozdíly

v indexu lomu mezi medúzami a okolním prostředím způsobují, že jejich těla vrhají stín. Následkem toho mohou být medúzy odhaleny.

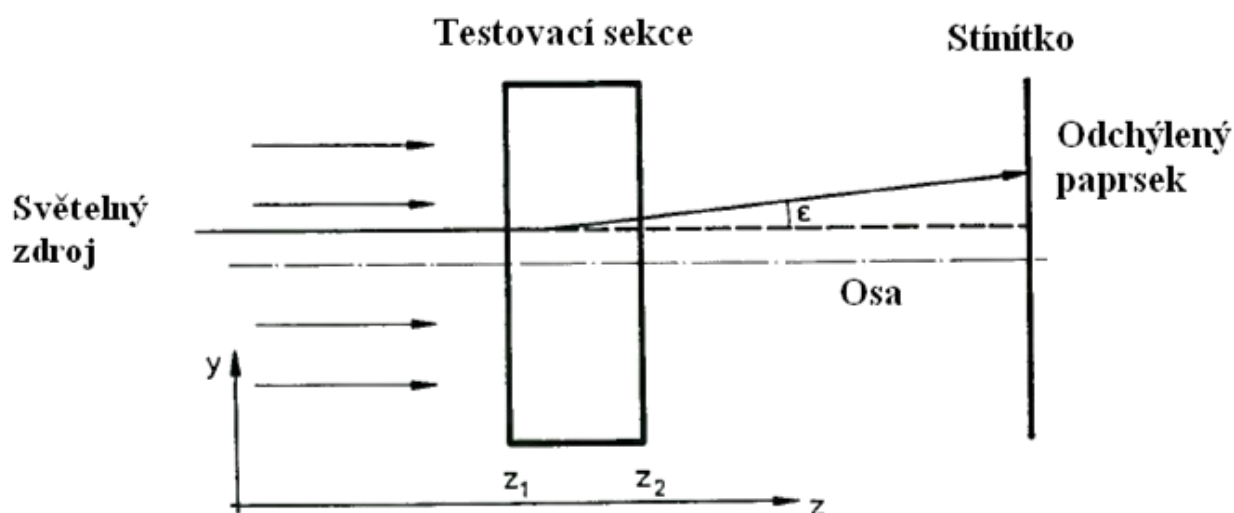
Lidské oči a běžné kamery nemají možnost rozlišit fázové rozdíly světelného paprsku. Rozeznají pouze amplitudu, barevný kontrast a příp. s pomocí vhodných „brýlí“ polarizaci. Znázorněním převodu fázových rozdílů na amplitudu, příp. barevné rozdíly je šlírový a stínový obraz.

Tyto metody jsou založeny na principu pozorování změn šíření světla, které prochází proudovým polem. Schopnost světelného paprsku se lámat v prostředí, které je vyplněno příslušným plynem, závisí na teplotě, hustotě a složení tohoto plynu a na vlnové délce použitého záření.

Prostřednictvím těchto metod lze získat snímky rozsáhlých proudových struktur a nespojitostí [5].

#### ○ *Stínová metoda*

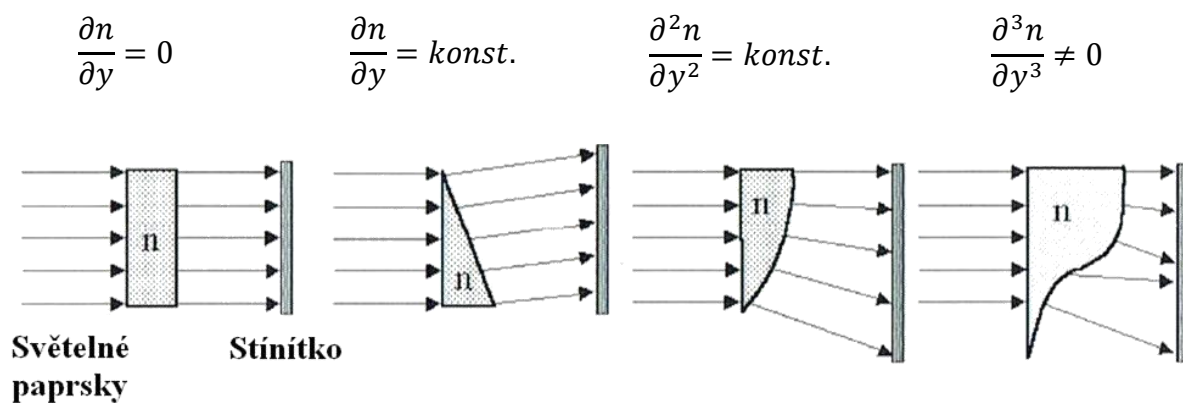
Stínová metoda je nejjednodušším zástupcem optických vizualizačních metod. Ve svém základním provedení nevyžaduje žádné speciální optické prvky, je třeba pouze světelného zdroje a stínítka [1].



Obr. 13 Schéma uspořádání prvků vizualizační tratě pro stínovou metodu [1]

Skrze homogenní látky se světlo šíří rovnoměrně. Důsledkem nehomogenit a rozruchů dochází k zakřivení paprsků. Podstatou metody je tedy zakřivování trajektorií paprsků světla při průchodu nehomogenním transparentním objektem. Na stínítka vlivem odklínění dopadají paprsky s různou hustotou, což má za následek lokální rozdíly v intenzitě osvětlení a vznik stínů, příp. kontur.

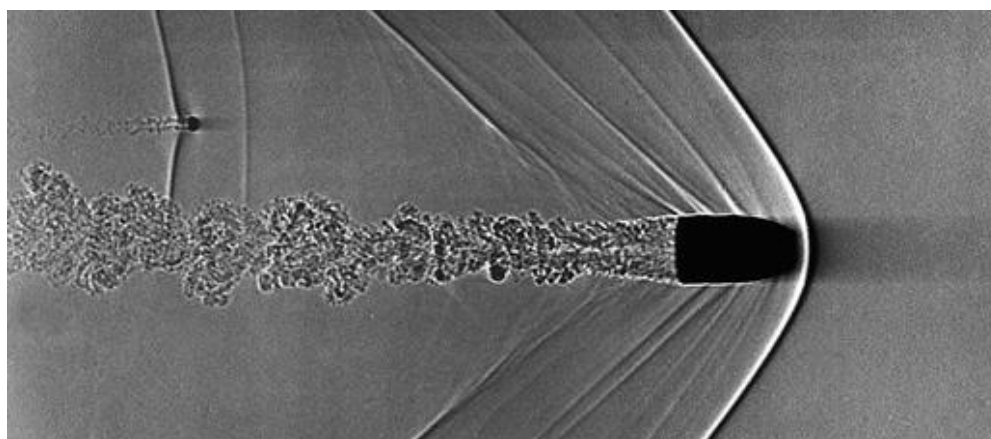
V zájmu vyhnout se u této metody šumu způsobeného difrakcí, se v tomto případě nevyužívá laser, ale tepelný zdroj světla [1]. Obvykle je tedy použito osvětlení ve formě krátkého pulzu, který je vyvozen baterkou, jiskřištěm nebo LED.



Obr. 14 Možné průběhy hustoty prostředí, které jsou vyvolány různými typy nehomogenit a odpovídající odchýlení paprsků [4]

Z Obr. 14 je patrné, že při konstantní hustotě prostředí, jímž světelný paprsek prochází, bude stínítko rovnoměrně osvětleno. Obdobný případ nastane při konstantní první derivaci indexu lomu dle souřadnice, kdy má hustota lineární průběh – paprsky se zalomí pod stejným úhlem. Při konstantní druhé derivaci indexu lomu dle souřadnice dojde sice k odchýlení paprsků pod různými úhly, ale vzhledem k divergentnímu charakteru jejich odklonu bude stínítko pouze osvětleno s nižší intenzitou. K vytvoření požadovaného obrazu, znázorňujícího rozdíly hustoty, dochází tedy jenom v případě, kdy je druhá derivace indexu lomu dle souřadnice nekonstantní [4].

Z výše uvedeného vyplývá, že metoda je vhodná pro zkoumání oblastí transparentního média, které vykazují výrazné rozdíly v indexu lomu – např. rázové vlny v rámci nadzvukového proudění.



Obr. 15 Střela pohybující se supersonickou rychlostí [17]

Nevýhody:

- Metoda je citlivá na druhou derivaci indexu lomu, což omezuje její využitelnost
- Získání kvantitativních charakteristik proudového pole je složité
- Poměrně nízké rozlišení obrazu
- Zkreslený obraz

## Výhody

- Bezkontaktní metoda
- Metoda je jednoduchá a nevyžaduje náročné optické vybavení

## Využití:

Metodu lze využít pro vizualizaci rázových vln, úplavu a přechodových oblastí proudění. Stínová metoda ve spojení s digitální obrazovou analýzou umožňuje získat také některé kvantitativní informace – např. lokální hodnotu Machova čísla [13].

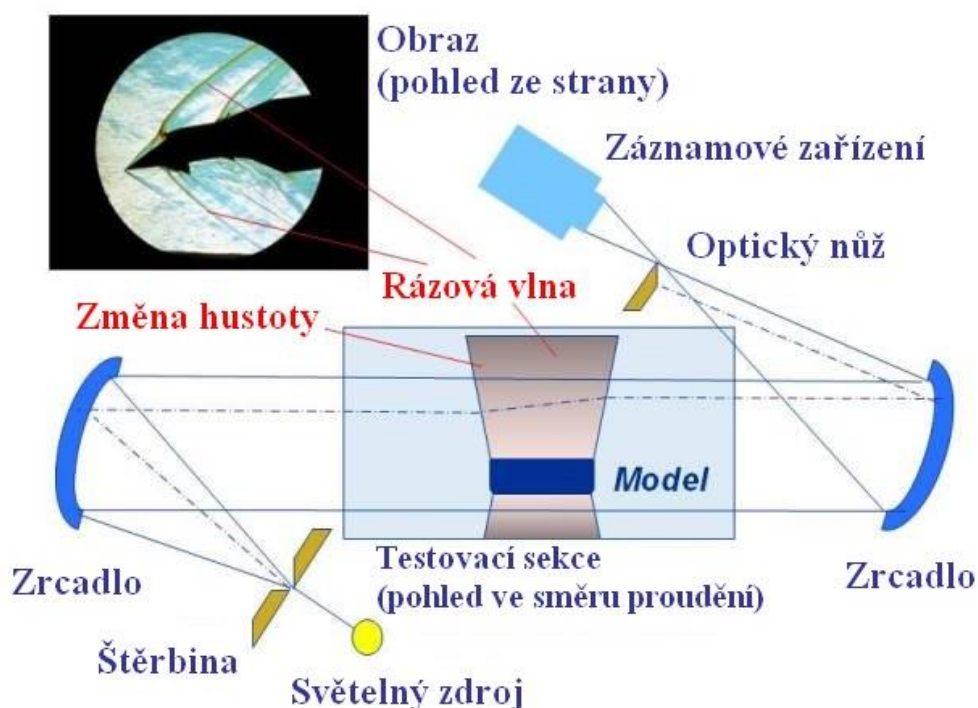
### ○ Šlírová (clonková) metoda

Jedná se o starší metodu, která je založena na předpokladu, že následkem změny hustoty prostředí dochází k zakřivování trajektorie světlených paprsků [12].

Na rozdíl od stínové metody využívá šlírová metoda filtraci paprsků pomocí clony (optického nože), vložené do ohniskové roviny zobrazovací čočky [10]. Tento optický nůž odstraní ohyb světla směrem dolů – na šlírovém obraze se zobrazí jako tmavé oblasti, a zachová ohyb světla směrem nahoru – na šlírovém obraze se zobrazí jako světlé oblasti [26].

Šlírový systém znázorněný na Obr. 16 využívá vlastností dvou konkávních zrcadel umístěných na protilehlých stranách testovací sekce aerodynamického tunelu.

Rtuťová výbojka, příp. jiskřiště zajišťuje funkci světelného zdroje. Světelný zdroj vysílá paprsek skrze štěrbinu a ta jej dělí na dva samostatné paprsky, které se při dopadu a následném odrazu od zrcadla stávají paralelními a směřují do testovací sekce aerodynamického tunelu. Na konci testovací sekce jsou tyto paprsky zachyceny druhým zrcadlem a směřovány na hranu optického nože. Nakonec tyto paprsky putují k záznamovému zařízení [12].



Obr. 16 Clonkový systém [12]

Šlírový obraz je vytvořen na základně citlivosti na první derivaci indexu lomu dle souřadnice, tudíž v místech, kde tato veličina nabývá určitých hodnot, je obraz tvořen souvislými oblastmi – pruhy.

V případě, že se paralelní paprsky v oblasti testovací sekce střetnou s určitým hustotním gradientem, dojde k jejich zakřivení nebo lomu. Ve znázorněném případě za podmínek supersonického proudění zapříčinil model umístěný v testovací sekci vznik rázové vlny. Rázové vlny jsou úzké oblasti o vysokých teplotních, tlakových a hustotních gradientech. Světelný paprsek se láme při průchodu rázovou vlnou dle čárkované čáry, která je znázorněna na Obr. 16. Paprsek v takovém případě dále neprochází ohniskem, ale je zastaven hranou nože. Výsledný snímek zaznamenaný kamerou obsahuje tmavší oblasti, které reprezentují hustotní gradienty. Jelikož model kompletně zamezuje průchodu světelných paprsků, na záznamu se objeví jako černý obraz. Rázové vlny vyvolané modelem jsou zobrazeny v podobě tmavých čar [12].

První šlírové fotografie byly černobílé. Na Obr. 16 je barevný šlírový snímek, který byl vytvořen vložením optického hranolu do blízkosti štěrbin, přičemž jako osvětlení se využilo bílého světla. Je nutno poznamenat, že záznam je dvourozměrný, zatímco rázové vlny jsou ve skutečnosti třírozměrné. Šlírové fotografie jsou tudíž schopny poskytnout určité hodnotné informace o poloze a intenzitě rázových vln, ale je třeba určitých zkušeností pro správnou interpretaci výsledků [12].

Nevýhody:

- Pro dosažení požadované přesnosti měření je vyžadováno přesné ustavení clony v ohniskové rovině [10]
- Citlivost na vlivy okolního prostředí

Výhody:

- Získané snímky jsou pořízeny v poměrně vysokém rozlišení
- Lze použít relativně jednoduchou optickou aparaturu
- Ve srovnání se stínovou metodou lze snadněji získat kvantitativní informace o rozložení hustoty ve sledované oblasti – definovat hustotní pole např. ve 2D proudící vrstvě plynu [2]
- Jedná se o bezkontaktní metodu – nedochází k ovlivnění proudění

Využití:

Šlírovou metodu lze s výhodou použít při zkoumání přenosových jevů – přenos tepla, hybnosti, příp. transportu látek [10]. Dále v rámci kvalitativního posouzení mezní vrstvy, pro zkoumání oblasti úplavu, při vizualizaci rázových vln. Metoda případně umožňuje získat i kvantitativní informace o proudění – hustotní pole.

- *Interferometrické metody*

Interferometrické metody jsou založeny na principu fyzikálního jevu zvaném interference, výstupem těchto metod je obvykle obraz, skládající se ze soustavy světlých a tmavých proužků – interferenční obrazec (interferogram), který je znázorněním fázových posuvů. Aby

mohl být interferenční obrazec pozorován, musí mít záření, která tvoří paprsky, stejnou frekvenci a v čase konstantní fázový posun – tedy být koherentní. Nejzřetelnějšího interferenčního obrazce lze dosáhnout v případě, že tato záření mají navíc stejnou amplitudu [4]. Za koherentní zdroje záření lze považovat např. lasery.

Metody této kategorie jsou obvykle realizovány rozdělením laserového paprsku na předmětový a referenční. Předmětový paprsek prochází prostředím, které obsahuje nehomogenitu, přičemž referenční paprsek prochází prostředím se stejnými parametry, avšak bez přítomnosti nehomogenity. Po průchodu těmito prostředím jsou paprsky opět spojeny a na stínítku tak vytvoří příslušný interferenční obrazec [3].

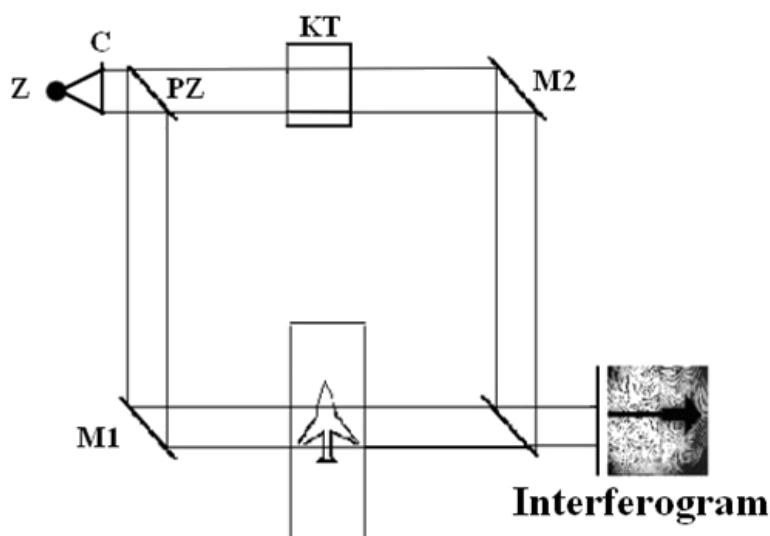
Proužky, které tento obrazec tvoří, odpovídají oblastem s konstantní hodnotou indexu lomu  $n$  a u stlačitelného proudění (plyny) také místům s konstantní hustotou  $\rho$ , což vyplývá ze závislosti (4), kde  $K$  je Gladstoneova-Daleova konstanta [22].

$$n = 1 + K \cdot \rho \quad (4)$$

#### ○ Klasická interferometrie

Nejpoužívanějším typem interferometrů při testech v aerodynamických tunelech je dle [18] Machův-Zehnderův interferometr.

Základní uspořádání je znázorněno na Obr. 17. Světelný paprsek zdroje Z je rozdělen pomocí polopropustného zrcadla PZ na referenční a předmětový paprsek. Předmětový paprsek dopadá na zrcadlo M1, které způsobí jeho zalomení a vede jej skrze testovací sekci. V zájmu kompenzace nežádoucích fázových posuvů, které by byly způsobeny skleněnými okny testovací sekce, se vkládají do dráhy referenčního paprsku odpovídající skleněné tabule (kompenzační tabule KT). Po opětovném spojení referenčního a předmětového paprsku vzniká interferenční obrazec [18].



Obr. 17 Schéma Machova-Zehnderova interferometru [18]

Podmínkou pro vytvoření co nejpřesnějšího interferenčního obrazce je v *ideálním* případě konstantní a shodná tloušťka použitých skleněných tabulí, jejich homogenní index lomu,

zajištění co nejlepší paralelity paprsků prostřednictvím zrcadel, která budou navíc disponovat vysokým stupněm odrazivosti a přesná montáž všech prvků, která zamezí jejich ohybu, případně jiným mechanickým deformacím. Důležitá je také ochrana celého zařízení proti vibracím a dalším vlivům okolního prostředí, které mají tendenci promítat se do výsledného záznamu [18].

Klasická interferometrie má dvě varianty [4]:

- metodu nekonečného proužku, kdy v případě nepřítomnosti nehomogenity v testovací sekci se soustava proužků nevytvoří, resp. proužek má nekonečnou šířku, a v případě přítomnosti nehomogenit proužky znázorňují izočáry hustoty, tuto metodu lze aplikovat za předpokladu použití kvalitních optických prvků a jejich přesného nastavení
- metodu proužku konečné šířky – interferometr je nastaven tak, že vznikne malý úhel mezi referenčním a předmětovým paprskem (obvykle prostřednictvím porušení symetrie zrcadel), přičemž se systém proužků zobrazí i v případě nepřítomnosti nehomogenity

Nevýhody:

- Poměrně vysoká citlivost (zejména při využití MZI) na vlivy okolního prostředí (prach, vibrace atd.)

Výhody:

- Poskytnutí kvantitativních informací
- Získaný záznam je kvalitnější než u předchozích optických metod
- Citlivost na absolutní změnu indexu lomu

Využití:

Interferometrii pomocí Machova-Zehnderova interferometru lze aplikovat prakticky u všech jevů, kde dochází ke změnám hustoty. Z interferogramů lze získat např. rozložení hustoty  $\rho(x,y,z)$ , teplot a tlaků, příp. koncentrace složek plynné směsi [10].

- *Metody využívající zavádění částic do tekutin*

Jedná se o metody, u kterých se využívá optických zařízení – laserů pro osvětlení požadované oblasti a částic, zaváděných do proudění, které zprostředkují vizualizaci dané oblasti.

Do této skupiny spadá metoda laserové roviny a její moderní verze – integrální laserová anemometrie (PIV).

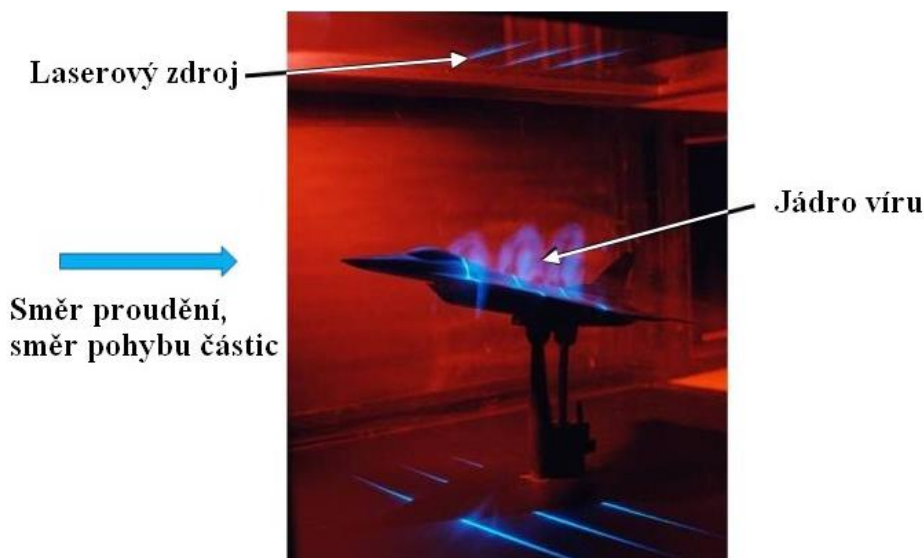
- *Metoda laserové roviny*

Model se osvětlí potřebným počtem laserových rovin a do proudění je vpuštěna jemná mlha, tvořená speciálními částicemi, které musí splňovat podmínky pro látky zaváděné do proudění (co nejpřesněji kopírovat pohyb proudění, aby se zamezilo jeho většímu ovlivnění).

Tenké laserové roviny jsou nastaveny obvykle kolmo na směr proudění, přičemž dochází prostřednictvím implementovaných částic ke zviditelnění příslušné roviny ve vymezeném prostoru.



Nevýhodou je, že lze zviditelnit pouze oblasti, které osvětluje laserová rovina. Příkladem je Obr. 18, ze kterého vyplývá, že není možno sledovat proudění v oblasti spodní části modelu. Moderní verzí této metody, která umožňuje nejen kvalitativní vizualizaci proudění, ale poskytuje i kvantitativní informace, je metoda PIV [12].



Obr. 18 Zviditelnění vírové plochy vznikající na prodloužené náběžné hraně letounu F16, vizualizace je provedena ve třech řezech [12]

#### ○ Integrální laserová anemometrie (PIV)

Jedná se o metodu, která umožňuje vizualizovat proudění pomocí částic, zaváděných do tekutiny, a následného počítačového zpracování obrazu. Cílem této vizualizační metody je získat vektorovou mapu rychlostí proudového pole [11].

#### • Princip metody PIV

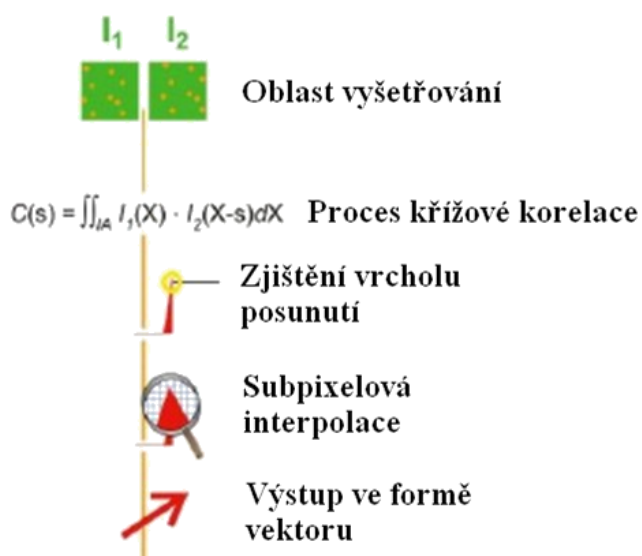
Při měření ve 2D je požadovaná rovina měřicího prostoru osvětlena světelným paprskem, který vychází z pulzního laseru a je upraven pomocí čočky do tvaru světelného nože. Poté jsou kamerou v krátkém časovém intervalu  $\Delta t$  zachyceny snímky okamžitých poloh částic.

Složka okamžité rychlosti  $v_x$  se určí ze vzdálenosti  $\Delta x$ , kterou částice v této ose za časový interval  $\Delta t$  urazila [11].

$$v_x = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (5)$$

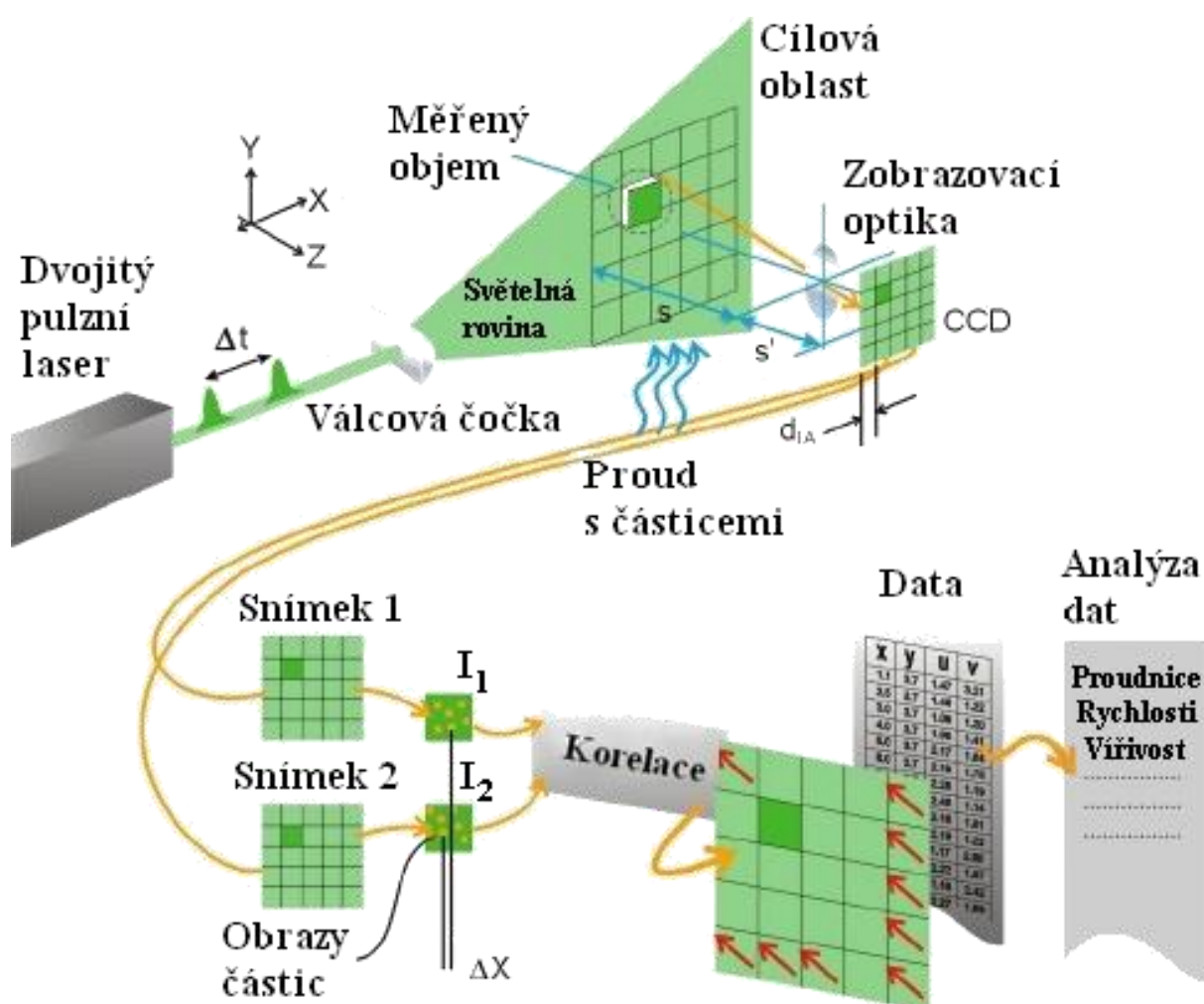
Vyhodnocování posunutí  $\Delta x$  probíhá následovně: čočka kamery promítne vybranou oblast na kamerový snímač, který je schopen zachytit každý světelný pulz na samostatný snímek [11].

Jakmile je zaznamenána posloupnost dvou (a více) světelných pulzů, jsou snímky rozděleny na malé podsekce o shodné velikosti, zvané oblasti vyšetřování, které musí obsahovat dostatečný počet obrazů částic. Pro korelační analýzu se nejčastěji využívá metoda křížové korelace, při níž jsou srovnávány odpovídající oblasti vyšetřování  $I_1$ ,  $I_2$  (viz Obr. 19). Výsledkem procesu je tzv. vrchol posunutí, jenž udává průměrný částicový posun  $\Delta x$  [11].



Obr. 19 Schéma procesu [11]

Rychlostní vektorová mapa celé zkoumané oblasti se získá ze dvou snímků zachycených kamerou při opakované křížové korelaci každé jejich oblasti vyšetřování.



Obr. 20 – Schéma vizualizační tratě pro PIV metodu [11]

- *Trasovací částice*

Vhodnými trasovacími částicemi jsou ty, které co nejpřesněji následují pohyb proudu a nezpůsobují změnu jeho vlastností.

Částice by měly být také netoxické, nekorozivní a chemicky inertní [4].

Pro vzduchové proudy se využívají obvykle olejové kapky o velikosti v rozmezí (1 – 5)  $\mu\text{m}$ .

Počet částic přítomných v proudu ovlivňuje výsledek křížové korelace – nalezení vrcholu posunutí.

U PIV našly využití také trasovací částice *DEHS*, které jsou tvořeny nerozpustnou, bezbarvou tekutinou, rozprašovanou vyvíječem částic. Rozprašené kapky mají mít dle [11] poměrně dlouhou životnost a poté se samovolně odpařit.

Pro vysoké teploty jsou požadovány keramické částice ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ), které poskytují výhodný index lomu, avšak jejich rozptýlení v plynném proudu může být obtížné (stejně jako u jiných práškových trasovacích částic).

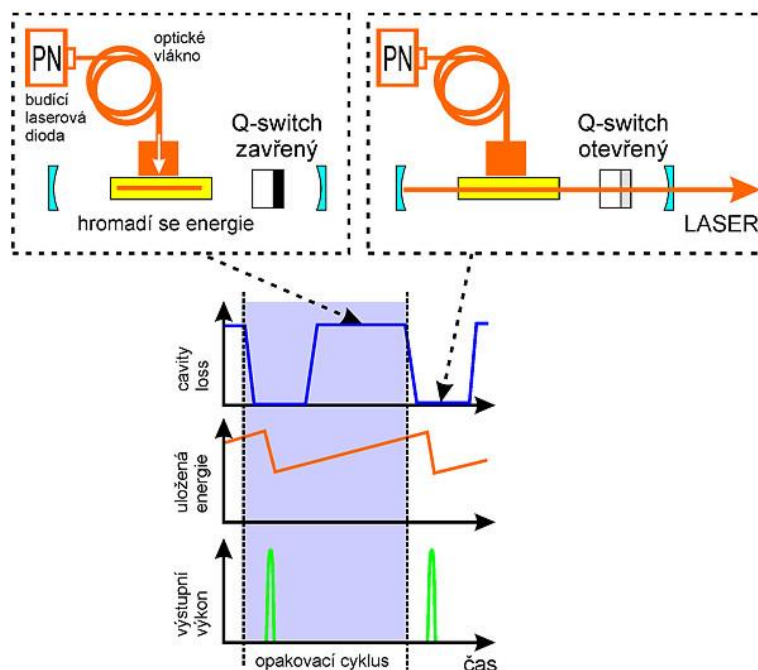
Dle [11] by se počet obrazů částic měl pohybovat okolo 10 – 25 v každé oblasti vyšetřování.

- *Lasery*

Lasery jsou u PIV metody široce využívány díky jejich schopnosti emitovat monochromatické světlo o vysoké energetické hustotě, což umožňuje následné snadné vytvoření tenké světlené vrstvy pro osvětlení a zaznamenání sledovaných částic bez chromatických vad [9].

Aby se předešlo rozmazání snímku, je třeba ozářit příslušnou rovinu ve velmi krátkém časovém intervalu. Je tedy vhodné zvolit co nejkratší laserový puls a tento dále zaostřit pomocí optické soustavy.

Intenzita laseru je řízena spouštěním výbojky a součásti, která převádí kontinuální režim na pulzní s vysokou energií – Q-switch [21].



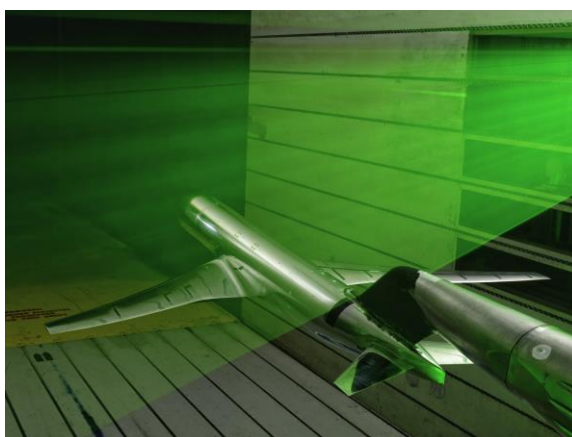
Obr. 21 Princip Q-switch [21]

V současné době se pro moderní PIV systémy nejvíce využívají pulzní lasery. Hojně používaný je např. dvojitý pulzní laser Nd:YAG, který emituje záření vlnové délky 532 nm (zelená barva), což umožňuje osvětlit částice v rámci záření spadajícího do rozmezí viditelného spektra.

- *Kamery*

Metoda PIV, která požaduje velmi krátké časové intervaly mezi jednotlivými snímky, obvykle využívá kamery s CCD nebo CMOS čipem, jež jsou vysoce citlivé a zachytí i nepatrný pohyb částic [11].

Kamery jsou černobílé – vzhledem k tomu, že paprsek laseru je monochromatický, barevný obraz není požadován.



*Obr. 22 Model letadla osvětlený laserovou rovinou [15]*

Nevýhody:

- Vysoká pořizovací cena
- Nutná synchronizace kamery s laserem

Výhody:

- Jedná se o přesnou metodu, která poskytuje množství informací o proudění
- Kvantitativní metoda
- Široký rozsah využití

Využití:

PIV metoda je považována v současné době za metodu vhodnou pro vyšetřování, popř. přezkoumávání konvenční problematiky proudového pole jako jsou mezní vrstvy, separované stříhové proudy nebo nestabilní proudy. Jednou z aplikací PIV může být také měření interakčních sil ve struktuře tekutin [4]. Jelikož nedochází k podstatnému ovlivnění silových měření, probíhajících současně s PIV, mohou být výsledky analýz velmi přesné [4]. Metoda PIV umožňuje zkoumat malé detaily i velké celky, navíc z hlediska množství získaných informací dalece přesahuje možnosti jednobodových měřících metod jako je např. metoda žhaveného drátku nebo LDA.

## 5 PŘEHLED METOD

Tab. 1 Shrnutí povrchových metod vizualizace proudění

|  | <i>Fyzikální metody</i>   | <i>Chemické metody</i>  | <i>Mechanické metody (olejové nátěry)</i>  | <i>Mechanické metody (nitřové sondy)</i>   | <i>Vizualizace pomocí teplotních polí</i>   |
|--|---|---|--|--|---|
| <i>Výhody</i>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Snadná realizovatelnost</li> <li>• Není třeba drahých optických zařízení</li> <li>• Vizualizovanou stopu lze zkoumat i mimo prostory tunelu</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ve srovnání s vizualizací pomocí kouře lze využít i při vyšších rychlostech</li> <li>• Rychlá a snadno realizovatelná metoda</li> </ul>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stopa setrvá i po vypnutí tunelu</li> <li>• Zřetelně je odlišena oblast přechodu, příp. separace proudění</li> </ul>                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vizualizace v jakékoliv poloze modelu</li> <li>• Jednoduchá aplikace</li> <li>• Levná metoda</li> <li>• Nedochází ke znečištění tunelu</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pro požadované podmínky proudění lze volit z široké škály tekutých krystalů, příp. využít nátěry</li> </ul>                      |
| <i>Nevýhody</i>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kontaktní metoda (určité ovlivnění proudění)</li> <li>• Nelze měnit polohu modelu během vizualizačního procesu</li> </ul>                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Některé chemické látky (chlor) jsou zdraví škodlivé a není vhodné je používat v uzavřených prostorech</li> <li>• Kontaktní metoda</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Stopa není trvalého charakteru</li> <li>• Model musí být tmavé barvy</li> <li>• Tlakové ventily musí být chráněny</li> <li>• Znečištění tunelu</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Metoda neposkytuje detailnější informace o proudění</li> <li>• Minibavlnky vyžadují více času při aplikaci na rozsáhlý povrch modelu</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Může dojít k rozrušení nátěrů nebo TK vlivem vysokých střihových napětí</li> <li>• U nátěrů je barevná změna nevratná</li> </ul> |
| <i>Rozmezí rychlostí proudění</i>                | Nízkorychlostní ( $50 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$ ) i nadzvukové proudění ( $2000 \text{ km} \cdot \text{hod}^{-1}$ )   | Podzvukové i nadzvukové rychlosti proudění  | Podzvukové i nadzvukové rychlosti proudění   | Od $2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , ideálně $30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$<br>• subsonické rychlosti proudění [1]   | Subsonické až hypersonické rychlosti proudění   |
| <i>Oblast využití</i>                            | • Vizualizace lokálního charakteru proudění na povrchu modelu, zejména vizualizace přechodových oblastí   | • Vizualizace lokálního charakteru proudění na povrchu modelu, zejména hranic přechodu proudění   | • Určení oblastí separace proudění<br>• Určení lokálního směru proudění<br>• Určení oblastí laminárního a turbulentního proudění   | • Směry lokálních rychlostí<br>• Vizualizace vírů, zpětných proudění, oblastí separace, oblastí nestabilního proudění atd.   | • Vizualizace teplotních polí na povrchu modelu<br>• Vizualizace hranic přechodu proudění   |
| <i>Ovlivnění proudění</i>                        | Malé  | Malé  | Malé   | U minibavlnek zanedbatelné   | Malé  |
| <i>Kvalitativní nebo Kvantitativní informace</i> | Především kvalitativní, ojediněle kvantitativní   | Kvalitativní  | Především kvalitativní, ale lze získat i kvantitativní   | Kvalitativní   | Kvalitativní i kvantitativní  |
| <i>Princip</i>                                   | Sublimace, odpařování nebo rozpouštění povrchového nátěru vlivem působícího proudění  | Chemická reakce mezi povrchovou krycí vrstvou a látkou, která je přimíchána do působícího proudění  | Kombinace vypařování a unášení olejové složky vlivem proudění za současné tvorby pigmentové stopy  | Sledování chování vláken připevněných na zkoumaném povrchu za působení proudění  | Reakce ve formě změny zbarvení povrchu pokrytého teplocitnou látkou na změnu teploty proudění   |
| <i>Možnost využití při letových zkouškách</i>    | Není běžné  | Ano   | Ne   | Ano  | TK – lze, ale není běžné<br>Nátěry – Ne   |

Tab. 2 Shrnutí vizualizačních metod využívajících zavádění látek do proudění

|   | <i><b>Zavádění látek tvořících souvislá vlákna (kouř, plamen)</b></i>   | <i><b>Zavádění látek netvořících souvislá vlákna (metoda heliových bublin)</b></i>  |
|---|---|---|
| <i><b>Výhody</b></i>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Snadná a rychlá realizace</li> <li>• Možno vizualizovat proudění v rámci celého proudového pole</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lze přímo sledovat chování proudového pole</li> <li>• Lze aplikovat u nestabilních proudění</li> </ul>   |
| <i><b>Nevýhody</b></i>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nelze použít za vyšších rychlostí proudění</li> <li>• Nutnost odvodu kouře</li> <li>• Znečištění prostorů tunelu</li> <li>• Nutno zabezpečit tlakové ventily před ucpáním</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tloušťka bublin se mění v závislosti na jejich poloze a ovlivňuje tím jejich zbarvení</li> <li>• Je třeba generátoru bublin – projeví se v pořizovací ceně zařízení</li> </ul> |
| <i><b>Rozmezí rychlostí proudění</b></i>                | Metoda je využitelná do $130 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$   | Podzvukové až nadzvukové rychlosti proudění   |
| <i><b>Oblast využití</b></i>                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Detekce vírů, oblastí separovaného proudění</li> <li>• Odhad trajektorií proudnic [2]</li> <li>• Určení oblastí laminárního a turbulentního proudění</li> </ul>                      | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vizualizace celého proudového pole</li> <li>• Možnost získání rychlostního pole</li> <li>• Široká aplikace v problematice proudění</li> </ul>                                  |
| <i><b>Ovlivnění proudění</b></i>                        | Malé  | Při správných parametrech bublin by k ovlivnění docházet nemělo   |
| <i><b>Kvalitativní nebo kvantitativní informace</b></i> | Kvalitativní i kvantitativní [2]  | Kvalitativní i kvantitativní  |
| <i><b>Princip</b></i>                                   | Sledování vláken kouře, která se pohybují s prouděním   | Zviditelnění proudění pomocí heliových bublin, které jsou tímto unášeny a kopírují jeho chování   |
| <i><b>Možnost využití při letových zkouškách</b></i>    | Ano   | Nepoužívá se  |



Tab. 3 Shrnutí optických vizualizačních metod

|  | <i>Refrakční metody</i>  | <i>Interferometrické metody</i>   | <i>Metody sledování částic v proudění (PIV)</i>   |
|--|--|---|---|
| <i>Výhody</i>                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Pohotová vizualizace ve velkém měřítku (stínová metoda)</li> <li>• Bezkontaktní metody</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lze přímo měřit hustotu proudění</li> <li>• Záznam všech informací na jedinou fotografickou desku</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lze měřit všechny tři složky rychlosti proudění</li> <li>• Získání vektorové mapy rychlostí v reálném čase</li> <li>• Sledování nestacionárních proudových polí</li> </ul> |
| <i>Nevýhody</i>                                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Redukce 3D proudění na 2D obraz a následné komplikované vyhodnocování informací, což znesnadňuje získávání kvantitativních informací</li> </ul>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vyžaduje dražší optická zařízení (zejména při použití MZI)</li> <li>• Zvláště u MZI citlivost na vlivy okolního prostředí (vibrace, prach atd.)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vysoká pořizovací cena</li> <li>• Třeba přesné synchronizace kamery a pulzního laseru</li> </ul>   |
| <i>Rozmezí rychlostí proudění</i>                | Od podzvukových po nadzvukové  | Od podzvukových po nadzvukové   | Od nulové rychlosti až po supersonické rychlosti [11]   |
| <i>Oblast využití</i>                            | Vizualizace rázových vln, rozhraní mezi prostředími, informace o rychlosti pohybu rozhraní, stanovení dynamického povrchového napětí, vizualizace přenosových jevů (např. tepla, hybnosti apod.) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Zkoumání komplexních proudových polí</li> <li>• Zkoumání přenosových jevů</li> </ul>   | Široký rozsah aplikace: biomedicínské výzkumy, výzkumy v rámci životního prostředí (spalování), letecký a automobilový průmysl – zkoumání obtékání atd.   |
| <i>Ovlivnění proudění</i>                        | Nedochází k ovlivnění  | Nedochází k ovlivnění   | Při vhodné volbě parametrů částic (velikost, materiál) by nemělo docházet k ovlivnění   |
| <i>Kvalitativní nebo kvantitativní informace</i> | Kvalitativní i kvantitativní   | Kvalitativní i kvantitativní  | Kvalitativní i kvantitativní  |
| <i>Princip</i>                                   | Vytvoření obrazu proudění (stínového/ šlírového obrazu) na základě změny hustoty transparentního objektu   | Interference referenčního a předmětového paprsku a následný vznik interferenčního obrazce, ze kterého jsou vyhodnocovány informace  | Sledování částic zavedených do proudění a následné vyhodnocení snímků pomocí počítače   |
| <i>Možnost využití při letových zkouškách</i>    | Nepoužívá se   | Ne  | Ne  |

## 6 VÝBĚR VIZUALIZAČNÍ METODY

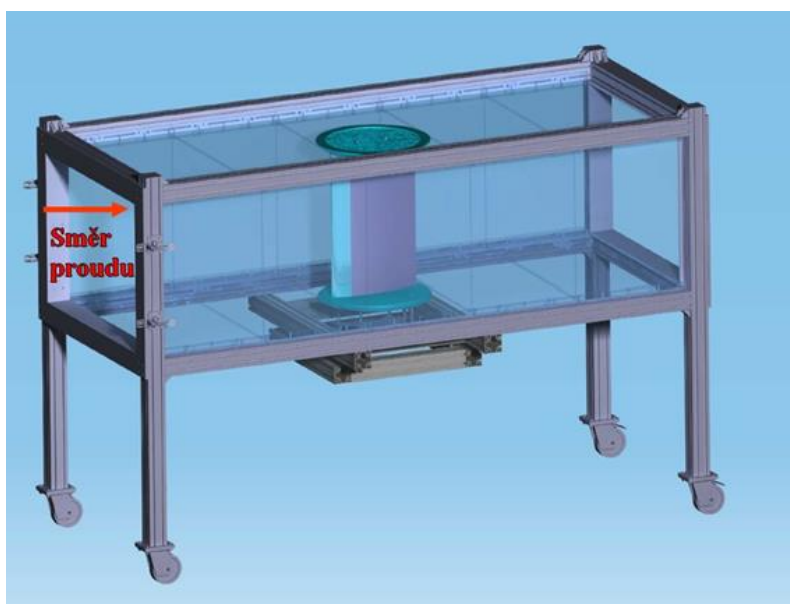
Cílem této části práce bylo stanovit vhodnou vizualizační metodu pro řešení konkrétního problému obtékání, jehož podmínky jsou uvedeny níže.

### 6.1 Podmínky experimentu

Do testovací sekce o rozměrech  $(500 \times 700 \times 2000)$  mm aerodynamického tunelu s uzavřeným okruhem bude vložen model profilu křídla dle Obr. 23.

Požadavkem je vizualizovat charakter proudění kolem profilu včetně oblasti úplavu a bodu odtržení proudnic v požadovaném rozsahu úhlů náběhu.

Maximální rychlost proudění v měřicím prostoru se předpokládá  $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .



Obr. 23 Uložení profilu křídla v testovací sekci aerodynamického tunelu

### 6.2 Stanovení vhodné metody

Při volbě metody byly na prvním místě zohledněny požadavky na výstupy vizualizačního procesu, dále se brala v potaz rychlost proudu v aerodynamickém tunelu, jeho konstrukce (uzavřený okruh), podmínky realizace vizualizační tratě a také její složitost. Na základě uvedených parametrů byly následně vybrány vhodné vizualizační metody pro zadaný případ obtékání a navržena jejich možná realizace.

Šlírová, stínová a interferometrická metoda, stejně jako metoda laserové roviny, PIV a byly z výběru vyloučeny, jelikož lze zvolit jiné metody, které poskytují dostačující informace v rámci požadavků na výstupy vizualizačního procesu, avšak jsou méně náročné ať už po finanční stránce, či z hlediska citlivosti na správné nastavení jednotlivých prvků vizualizační tratě.

Vzhledem k požadavkům na výstupy vizualizačního procesu, kdy je cílem zviditelnit i oblast úplavu, lze říci, že metody spadající do kategorie povrchových metod jsou v tomto



případě nedostačující, jelikož umožňují vizualizovat proudění pouze na povrchu modelu a nikoliv mimo něj. Tyto metody tedy byly z uvedeného důvodu z výběru také vyloučeny.

Výjimku u povrchových metod tvoří pouze metoda nit'ových sond, kterou však lze zařadit za mírné modifikace i do objemových metod a využít tak pro zkoumání charakteru proudění mimo povrch modelu.

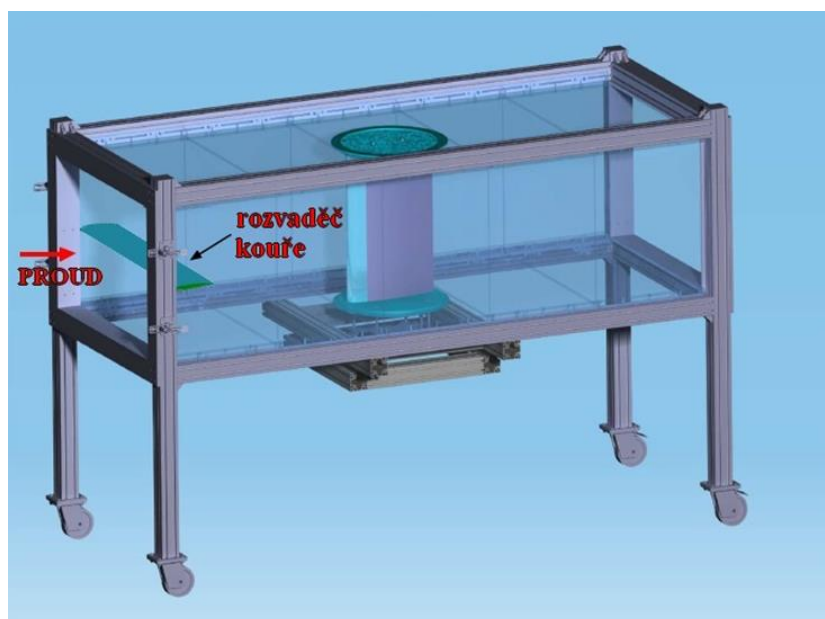
Z objemových metod dále splňuje požadavky v rámci schopnosti zviditelnění požadovaných charakteristik metoda vizualizace pomocí kouře a metoda vizualizace pomocí heliových bublin.

### **6.2.1 Aplikace metody vizualizace proudění pomocí kouře**

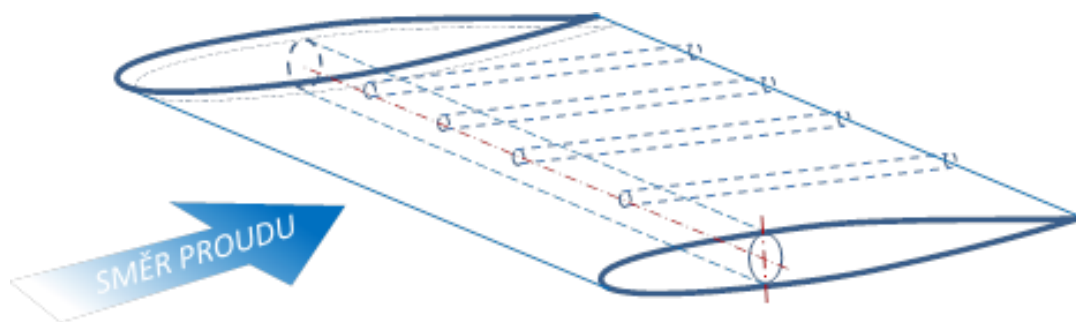
U metody vizualizace pomocí kouře je nutno zvážit její použitelnost při vyšších rychlostech proudění. Jelikož je metoda schopna poskytnout informace do rychlosti proudění přibližně  $130 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  a proudění v daném aerodynamickém tunelu bude dosahovat pouze rychlosti  $60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , dá se předpokládat, že nedojde k rozptýlu kouřových vláken a tedy narušení vizualizačního procesu z důvodu vysoké rychlosti proudění.

Vzhledem k uzavřenému okruhu konkrétního aerodynamického tunelu je dále nutné zvážit způsob odvodu kouře z jeho prostor, což by bylo možné řešit v případě potřeby přerušením vizualizačního procesu mezi jednotlivými běhy a vyvětráním kouře z prostor tunelu. Zaplnění prostorů kouřem závisí na jeho vpravovaném množství, proto je vhodné přivádět kouř pouze do potřebných míst, která budou následně zaznamenávána. Vzhledem ke skutečnosti, že se jedná o měření profilu, je postačující zviditelnit proudění pouze v jednom řezu – v ose měřicího prostoru, kde se předpokládá minimální ovlivnění stěnami tohoto měřicího prostoru.

Z tohoto požadavku a také z uložení profilu v testovací sekci vyplývá konstrukční řešení rozvaděče kouře, který by bylo vhodné umístit vodorovně uprostřed vstupu do testovací sekce aerodynamického tunelu (viz uložení rozvaděče v testovací sekci na Obr. 24). Z důvodu minimalizace ovlivnění proudění vlivem přítomnosti rozvaděče by bylo vhodné tento vyrobit jako profilovaný – např. dle Obr. 25.



Obr. 24 Schéma umístění rozvaděče kouře v testovací sekci aerodynamického tunelu, není kresleno v měřítku



Obr. 25 Ideový návrh rozvaděče kouře

Záznam proudění by bylo z důvodu přítomnosti kruhových desek z plexiskla (viz Obr. 23) vhodné realizovat prostřednictvím dvou kamer umístěných na tyto desky – pro snímání oblasti nad a pod profilem. Případně lze tyto desky vyrobít z materiálu, který nezpůsobuje zkreslení záznamu či odlesky a snímat proudové pole obyčejným záznamovým zařízením z pohledu shora.

Spodní část testovací sekce je nutné kvůli zajištění dobré viditelnosti vizualizovaného proudění opatřit tmavým pozadím – např. černým kartonem.

Pro realizaci vizualizačního procesu je třeba vyvíječe kouře, rozvaděče kouře, snímacího zařízení, osvětlení (rtuťová výbojka, LED nebo laser) a případně zařízení na odsávání kouře.

### 6.2.2 Aplikace metody vizualizace pomocí heliových bublin

V porovnání s předchozí metodou nevyžaduje tato metoda odvod vizualizačního média. Pro požadované charakteristiky proudění není třeba vytvářet barevné heliové bubliny, postačí monochromatické.

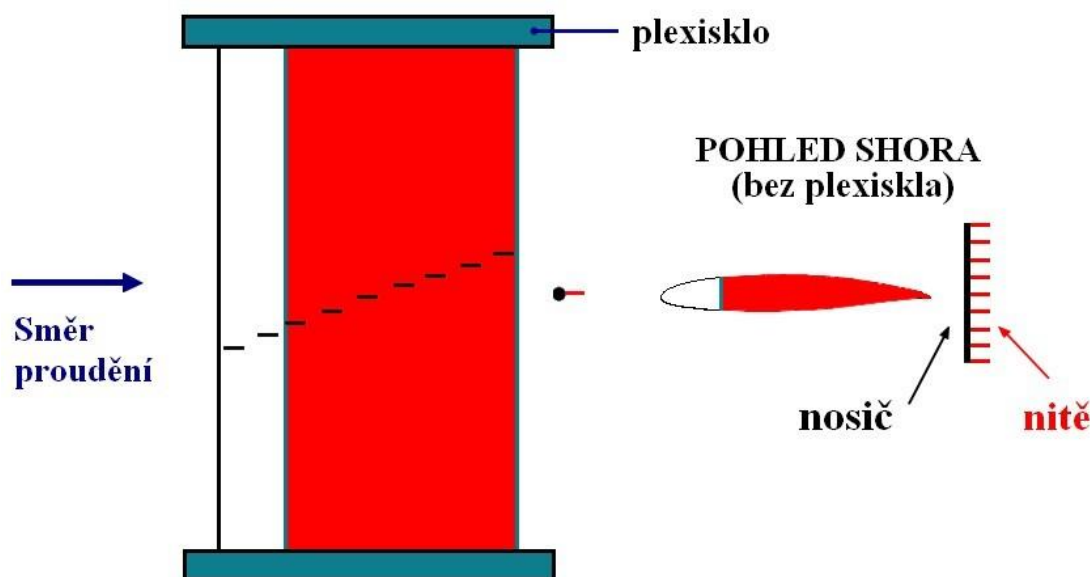
Tato metoda navíc umožňuje v případě modifikace vizualizační tratě a následného využití křížové korelace stanovit rychlostní pole. V takovém případě by však bylo nutné zařadit pulzní světelný zdroj a synchronizovat s těmito pulzy kameru, což vede na PIV metodu.

Rozvod vizualizačního média lze realizovat pomocí obdoby rozvaděče, který je uveden u metody vizualizace pomocí kouře, stejně jako realizaci záznamu prováděného testu. Pro dobrou viditelnost vizualizovaného proudění je vhodné volit osvětlení ve směru tohoto proudění a alespoň spodní část testovací sekce opatřit tmavým pozadím.

Pro realizaci vizualizačního procesu je třeba generátoru heliových bublin, přívaděče, fotoaparátu popř. kamery a osvětlení (např. rtuťová výbojka, LED příp. laser).

### 6.2.3 Aplikace metody vizualizace proudění pomocí nit'ových sond

Jelikož je cílem zviditelnit bod odtržení proudnic, je třeba na povrch modelu aplikovat nit'ové sondy. Zároveň je však požadována vizualizace šířky úplavu, což nitě, připevněné pouze na povrchu modelu, neumožňují. Tento problém lze řešit např. pomocí nosiče nití, který je veden napříč testovací sekcí aerodynamického tunelu (znázornění nosiče viz Obr. 26) a opatřen nit'ovými sondami. Na povrchu modelu jsou nitě umístěny diagonálně, čímž se sníží jejich vzájemné ovlivňování (viz Obr. 26 vlevo).



Obr. 26 Rozmístění nití po profilu a znázornění nosiče nití

Vzhledem k rozměrům modelu je vhodné volit metodu minibavlnek – jedná se o sondy tvořené nylonovým příp. polyesterovým monovláknem (běžně dostupné v textilním průmyslu o několika různých průměrech), které způsobují dle referencí minimální ovlivnění proudění.

Jelikož jsou tyto sondy poměrně malé, je vhodné v rámci zlepšení viditelnosti je potáhnout fluorescenčním barvivem příp. zakoupit již nitě s touto vlastností a posléze nasvítit UV světelným zdrojem. V takovém případě není třeba vyžadovat tmavou barvu modelu a stěn testovací sekce, požadováno je pouze určité zastínění tohoto prostoru – zamezení přímého vlivu denního světla, které snižuje efekt UV záření. Rozestup mezi jednotlivými nitěmi by se měl volit větší, než je délka nitě, aby se předešlo jejich zamotání.

Na povrch modelu lze nitě připevnit např. lepícím lakem. Při volbě rozměrů nití je vhodné vycházet z intervalů dle [39]: průměr nitě by se měl pohybovat okolo (20 – 50)  $\mu\text{m}$  a její délka by měla být přibližně (6 – 20) mm.

Zaznamenání vizualizačního procesu je možné stejným způsobem jako u předchozích dvou případů.

Pro realizaci vizualizačního procesu je třeba nit'ových sond, lepidla, drátu, kamery a UV světelného zdroje.

### 6.3 Zhodnocení

V rámci poskytnutí požadovaných charakteristik proudění je metoda vizualizace proudění pomocí kouře a metoda vizualizace proudění pomocí heliových bublin prakticky rovnocenná. Metoda vizualizace pomocí kouře obnáší nevýhodu ve formě možného zaplnění měřicího prostoru kouřem, což je třeba řešit jeho odvodem. Metoda heliových bublin je z tohoto hlediska výhodnější, avšak náklady na zařízení potřebného vybavení pro její realizaci jsou vyšší. Tato metoda však umožňuje mimo jiné v případě přechodu na PIV metodu stanovit rychlostní pole. U obou metod je také třeba počítat s určitým znečištěním prostorů

aerodynamického tunelu přítomností vizualizačního média a nutností opatřit alespoň spodní stěnu testovací sekce tmavým pozadím pro dosažení dobré viditelnosti vizualizovaného proudění.

Metoda vizualizace proudění pomocí minibavlnek je ve srovnání s předchozími dvěma metodami velmi jednoduchá, nejméně finančně náročná a při její aplikaci nedochází ke znečištění prostorů testovací sekce. Nedostatkem ve srovnání s předchozími dvěma metodami je pouze částečná vizualizace úplavu a při špatně zvolených rozměrech nití hrozící ovlivnění proudění. Pro řešení zadaného problému však metoda vizualizace proudění pomocí minibavlnek poskytuje dostatečné množství informací a je tedy možné ji v tomto konkrétním případě využít.

## 7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provést rešerši metod vizualizace proudění a to jak z historického hlediska, tak z hlediska aktuálně intenzivně využívaných moderních metod.

Práce je soustředěna do oblasti řešení problémů proudění v aerodynamických tunelech, příp. při letových zkouškách – tedy tam, kde se jedná o proudění plynů.

Rešeršní část práce obsahuje přehled vizualizačních metod proudění, využívaných v průběhu posledních desetiletí, a případně také jejich moderní obměny. Je však nutné podotknout, že některé metody se moderní obměny nedočkaly a jsou stále využívány ve své prvotní formě, nebo nebyla jejich moderní alternativa dohledatelná z českých ani zahraničních zdrojů informací.

U každé metody byl dále uveden její princip, výhody, omezení a také oblast aplikace. Z rešeršní části práce vyplývá, že pro konkrétní požadavky při řešení problému obtékání v aerodynamických tunelech popř. za letových zkoušek, lze volit z širokého rozmezí metod a může tak být v případě vhodně zvolené metody zohledněno i více požadavků současně.

Uvedené poznatky byly dále uplatněny ve druhé části práce, která se zabývá volbou vhodné vizualizační metody pro požadavky obtékání kolem profilu křídla v aerodynamickém tunelu Leteckého ústavu VUT v Brně.

Vybrány byly tři metody, které dané požadavky splňují – metoda vizualizace proudění pomocí kouře, metoda minibavlnek a metoda heliových bublin. U každé metody byla nastíněna její praktická realizace a uvedeny prvky, potřebné pro vytvoření vizualizační tratě. U každé metody byla také zohledněna přibližná celková cena vybavení, která však nebyla uvedena číselně, jelikož se ceny jednotlivých prvků vizualizační tratě u konkrétních výrobců liší, případně nebyly přímo dohledatelné.

Jednoznačně nelze posoudit, která z uvedených třech metod je pro daný problém nejvhodnější, jelikož každá obnáší určité nevýhody, ať už z hlediska finanční náročnosti (metoda heliových bublin), nutnosti odvodu vizualizačního prostředku (metoda vizualizace pomocí kouře), nebo pouze částečné vizualizace proudového pole (metoda minibavlnek) a záleží tedy pouze na prioritách testování.

V tab. 4 jsou posouzeny vybrané metody dle různých hledisek, kde hodnota 1 představuje minimum a hodnota 3 maximum v rámci dané priority.

Tab. 4 – Zhodnocení metod dle různých priorit

| <i>Hledisko</i>                                      | <i>Vizualizační metoda</i> |  |                                |
|--|----------------------------|--|--------------------------------|
|  | <i>Metoda minibavlnek</i>  | <i>Metoda vizualizace pomocí kouře</i> | <i>Metoda heliových bublin</i> |
| <i>Cena</i>  | 1                          | 2                                      | 3                              |
| <i>Míra znečištění prostorů tunelu</i>               | 1                          | 3                                      | 2                              |
| <i>Potřebná úprava stěn testovací sekce a tunelu</i> | 1                          | 3                                      | 2                              |
| <i>Rozsah zviditelněného proudového pole</i>         | 1                          | 3                                      | 3                              |

## SEZNAM ZDROJŮ

- [1] MERZKIRCH, Wolfgang. *Flow visualization*. 2nd ed. Orlando: Academic Press, 1987, 260 s. ISBN 0-12-491351-2.
- [2] ŘEZNÍČEK, Radoš. *Visualisace proudění: Optické metody vyšetřování proudění tekutin*. Praha: Academia, 1972, 176 s.
- [3] BARLOW, Jewel B., William H. RAE a Alan POPE. *Low-speed wind tunnel testing*. 3rd ed. New York: John Wiley, 1999, xii, 713 s. ISBN 0-471-55774-9.
- [4] SMITS, Alexander J. a T. T. LIM. *Flow visualization: techniques and examples*. 2nd ed. London: Imperial College Press, 2012, xiv, 427 s. ISBN 978-1-84816-791-9.
- [5] SETTLES, G. S. *Schlieren and shadowgraph techniques: visualizing phenomena in transparent media*. Berlin: Springer, 2001, 369 s. ISBN 3-540-66155-7.
- [6] PRANDTL, Ludwig, OERTEL, Herbert, ed. *Prandtl's Essentials of Fluid Mechanics*. 2nd ed. New York: Springer, 2004. ISBN 0-387- 40437-6.
- [7] Ernst Mach a letectví. PÍŠTĚK, Antonín, DUB, Petr a Jana MUSILOVÁ, ed. *Ernst Mach – Fyzika – Filosofie – Vzdělávání*. Brno: Masarykova univerzita, 2010, s. 123-129. ISBN 978-80-210-4808-9.
- [8] MERCER, Carolyn R., ed. *Optical metrology for fluids, combustion, and solids*. Boston: Kluwer Academic, 2003, ISBN 1402074077
- [9] RAFFEL, M. *Particle image velocimetry: a practical guide*. 2nd ed. Berlin: Springer, 2007, xx, 448 s. ISBN 978-3-540-72307-3.
- [10] PAVELEK, M., E. Janotková a J. ŠTĚTINA. *Vizualizační a optické měřicí metody* [online]. 2007 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/optika/index.htm>
- [11] Dantec Dynamics. *Particle Image Velocimetry measurement principles* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.dantecdynamics.com/>
- [12] Wind Tunnel Index. In: *National Aeronautics and Space Administration: Glenn Research Center* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/shortt.html>
- [13] Flow visualization. In: *William E. Boeing department of Aeronautics & Astronautics* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <https://www.aa.washington.edu/AERL/KWT/techguide/flowviz>
- [14] Visualization of Surface Streamlines and Shear Stres. In: *Central Aerohydrodynamic Institute* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.tsagi.ru/en/research/measurements/oil/>
- [15] Flow visualization. In: *National Aeronautics and Space Administration: Glenn Research Center* [online]. [cit. 2017-03-17]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/centers/ames/orgs/aeronautics/windtunnels/multimedia/lm1\\_1600.html](https://www.nasa.gov/centers/ames/orgs/aeronautics/windtunnels/multimedia/lm1_1600.html)
- [16] Glow with the flow. In: *National Aeronautics and Space Administration: Glenn Research Center* [online]. Lillian Gipson. 2016 [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/aero/flow\\_patterns\\_image.html](https://www.nasa.gov/aero/flow_patterns_image.html)
- [17] DAVIDHAZY, Andrew. *Photographs by Andrew Davidhazy* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <https://people.rit.edu/andpph/exhibit-3.html>
- [18] RISTIĆ, Slavica. *Flow visualization techniques in wind tunnels –optical methods (Part II)* [online]. In: . 2007, s. 38-49 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.vti.mod.gov.rs/ntp/rad2007/2-07/rist/rist.pdf>

- [19] DONG, Zhao. *Colour helium bubble flow visualization technique* [online]. In: . China: Harbin Aerodynamic Research Institute, 1986, s. 900-904 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS1986/ICAS-86-1.7.1.pdf](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS1986/ICAS-86-1.7.1.pdf)
- [20] NACA 4412 airfoil at large negative AoA. In: *Smart blade* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://smart-blade.com/rd/visualization-wind-tunnels.html>
- [21] Princip pevnolátkových Nd:YAG laserů - 1064 nm Infra red. In: *Leonardo technology* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://www.lt.cz/e-learning/laser/princip-pevnolatkovych-nd-yag-laseru-1064-nm-infra-red>
- [22] KLEINE, Harald, Hans GRÖNIG a Kazuyoshi TAKAYAMA. Simultaneous Shadow, Schlieren and Interferometric Visualization of Compressible Flows. *Optics and Lasers in Engineering* [online]. Elsevier, 2006, s. 170-189 [cit. 2017-04-15]. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2005.04.009. ISSN 0143-8166.
- [23] eFluids Gallery of Images – Leonardo da Vinci [online]. [cit. 2017-04-15] Dostupné z: [http://www.efluids.com/efluids/gallery/gallery\\_pages/da\\_vinci\\_page.htm](http://www.efluids.com/efluids/gallery/gallery_pages/da_vinci_page.htm).
- [24] JANDORA, Radek. *Hydrodynamika* [online]. In: . [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f06.htm>
- [25] RAFFEL, Marcus. *PIV from lab to large wind tunnel* [online]. Department Technical Flows Institute of Aerodynamics and Flow Technology German Aerospace Center (DLR), 2009 [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: [http://25-years-piv.dlr.de/fileadmin/Template/Presentations/L\\_H08\\_Raffel.pdf](http://25-years-piv.dlr.de/fileadmin/Template/Presentations/L_H08_Raffel.pdf)
- [26] URUBA, Václav. *Optické metody využívající změn hustoty média* [online] Ústav termomechaniky AV ČR. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/hustota.pdf>
- [27] URUBA, Václav. *Dynamika tekutin* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: [http://home.zcu.cz/~uruba/MT/koment/MT\\_03k.pdf](http://home.zcu.cz/~uruba/MT/koment/MT_03k.pdf)
- [28] URUBA, Václav. *Mechanika tekutin* [online] Ústav termomechaniky AV ČR. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: [http://home.zcu.cz/~uruba/MT/MT\\_03.pdf](http://home.zcu.cz/~uruba/MT/MT_03.pdf)
- [29] FRANTZ-DALE, Ben. *A wind tunnel model of a Cessna 182 showing a wingtip vortex* [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: [https://faculty.kaust.edu.sa/sites/markushadwiger/Documents/CS247\\_spring2017\\_lecture\\_24.pdf](https://faculty.kaust.edu.sa/sites/markushadwiger/Documents/CS247_spring2017_lecture_24.pdf)
- [30] ŠOFER, Michal. *Optické metody* [online]. [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~sof007/files/EMvM/p7.pdf>
- [31] ROTT, N. *Note on the history of the Reynolds number* [online]. In: . Stanford, California: Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, 1990 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: [http://158.110.32.35/download/CERN07/R\\_ARFM\\_90.pdf](http://158.110.32.35/download/CERN07/R_ARFM_90.pdf)
- [32] KREHL, P. a S. ENGEMANN. *August Toepler — The first who visualized shock waves* [online]. 1995 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1007/BF02425031.
- [33] MUELLER, Thomas J., *Smoke Visual zation in Wind Tunnels* [online]. Notre Dame University, 1983 [cit. 2017-05-21]. Dostupné z: <https://crgis.ndc.nasa.gov/crgis/images/b/b6/TRP00668.pdf>
- [34] GHARIB, M., a kol. *Leonardo's vision of flow visualization* [online]. In: . Springer-Verlag, 2002, s. 219-223 [cit. 2017-05-21]. DOI: 10.1007/s00348-002-0478-8.

- [35] Aerodynamics for students. *Multidisciplinary Design Project* [online]. Sydney: Aerospace, Mechanical & Mechatronic Engg, 2005 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal\\_dvd\\_only/aero/fprops/cvanalysi/s/node6.html](http://www-mdp.eng.cam.ac.uk/web/library/enginfo/aerothermal_dvd_only/aero/fprops/cvanalysi/s/node6.html)
- [36] Sketches showing fluid flow. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/74/Streamline\\_streakline\\_pathline.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/74/Streamline_streakline_pathline.jpg)
- [37] YANG, Jianming. *Flow Patterns: Streamlines, Streaklines, Pathlines* [online]. In: . 2012 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [http://user.engineering.uiowa.edu/~me\\_160/lecture\\_notes/lec06\\_2012.pdf](http://user.engineering.uiowa.edu/~me_160/lecture_notes/lec06_2012.pdf)
- [38] The china clay method. In: *Helicopters & Aircrafts* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://heli-air.net/2016/04/17/the-china-clay-method/>
- [39] Luminescent Mini-tufts. In: *Central Aerohydrodynamic Institute* [online]. [cit. 2017-05-10]. Dostupné z: <http://www.tsagi.ru/en/research/measurements/tufts/>
- [40] FISHER, David F. a Robert R. MEYER, JR. *Flow Visualization Techniques for Flight Research* [online]. 1988, s. 1-32 [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88145main\\_H-1524.pdf](https://www.nasa.gov/centers/dryden/pdf/88145main_H-1524.pdf)



## **SEZNAM ZKRATEK**

|     |  |
|-----|--|
| DLR | Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt |
| PIV | Particle Image Velocimetry                 |
| IR  | Infrared                                   |
| UV  | Ultraviolet                                |
| TK  | Tekuté krystaly                            |